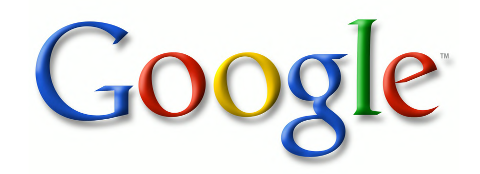
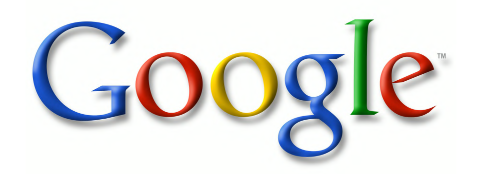




Experimentelle Untersuchungen

am

Polycyklischen Stromverteilungssystem Arnold - Bragstad - la Cour.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

der Abteilung für Elektrotechnik
der Grossh. Badischen Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe

vorgelegt von

FRITZ MARGUERRE
Dipl.-Ing. aus Gent.

Genehmigt von der Technischen Hochschule zu Karlsruhe.

Referent: Hofrat Professor E. ARNOLD.
Korreferent: Privatdozent O. S. BRAGSTAD.

STUTTGART.
DRUCK DER UNION DEUTSCHE VERLAGSGESELLSCHAFT.
1904.



Experimentelle Untersuchungen am Polycyklischen Stromverteilungssystem Arnold - Bragstad - la Cour.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs

der Abteilung für Elektrotechnik
der Grossh. Badischen Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe

vorgelegt von

FRITZ MARGUERRE
Dipl.-Ing. aus Gent.

Genehmigt von der Technischen Hochschule zu Karlsruhe.

Referent: Hofrat Professor E. ARNOLD.
Korreferent: Privatdozent O. S. BRAGSTAD.

STUTTGART.
DRUCK DER UNION DEUTSCHE VERLAGSGESELLSCHAFT.
1904.

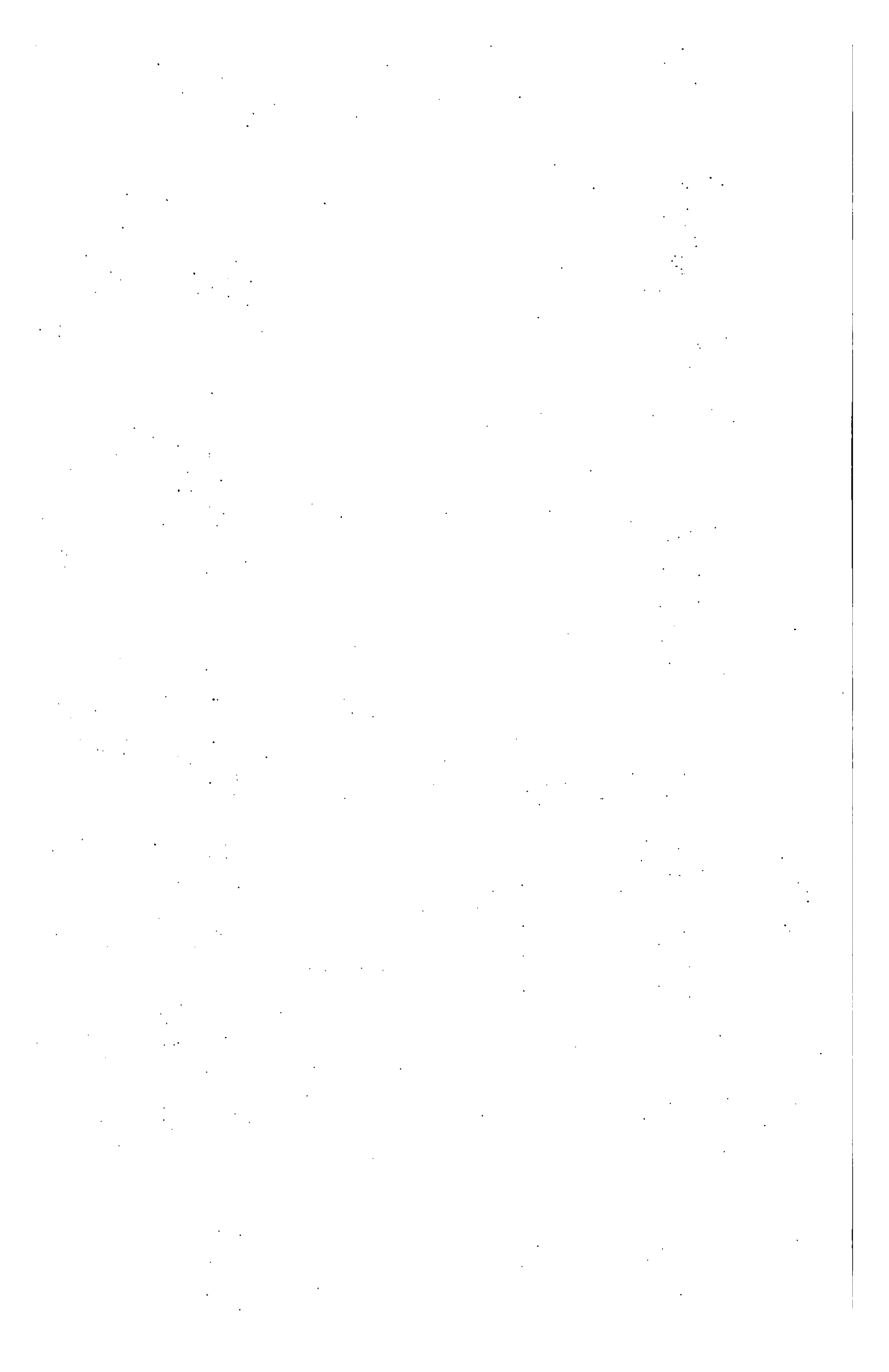
Die vorliegende Arbeit wurde im Elektrotechnischen Institut der Technischen Hochschule Karlsruhe ausgeführt. Dem Direktor des Instituts, meinem verehrten Lehrer Professor E. Arnold, bin ich für die bei derselben gewährten Unterstützung zu grossem Danke verpflichtet.

Baden (Schweiz), Januar 1904.

F. Marguerre.

MEINEM VATER.

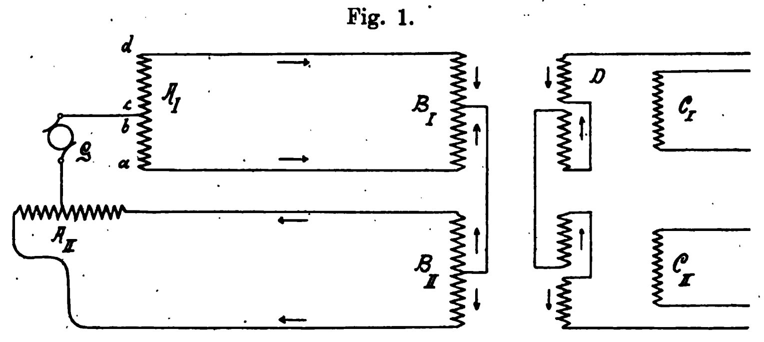
Inhalt.



Einleitung.

Das polycyklische Stromverteilungssystem, dessen experimentelle Untersuchung im Elektrotechnischen Institut der Technischen Hochschule Karlsruhe ausgeführt wurde und im folgenden beschrieben werden soll, findet sich in den Deutschen Reichspatentschriften Nr. 127 792, 128 406 und 131 550 erläutert; eine eingehende Würdigung der Vorteile des Systems und seines Anwendungsgebietes ist in der E.T.Z. 1902, Heft 26 und 27 gegeben. Es wird daher hier

Fig. 1.



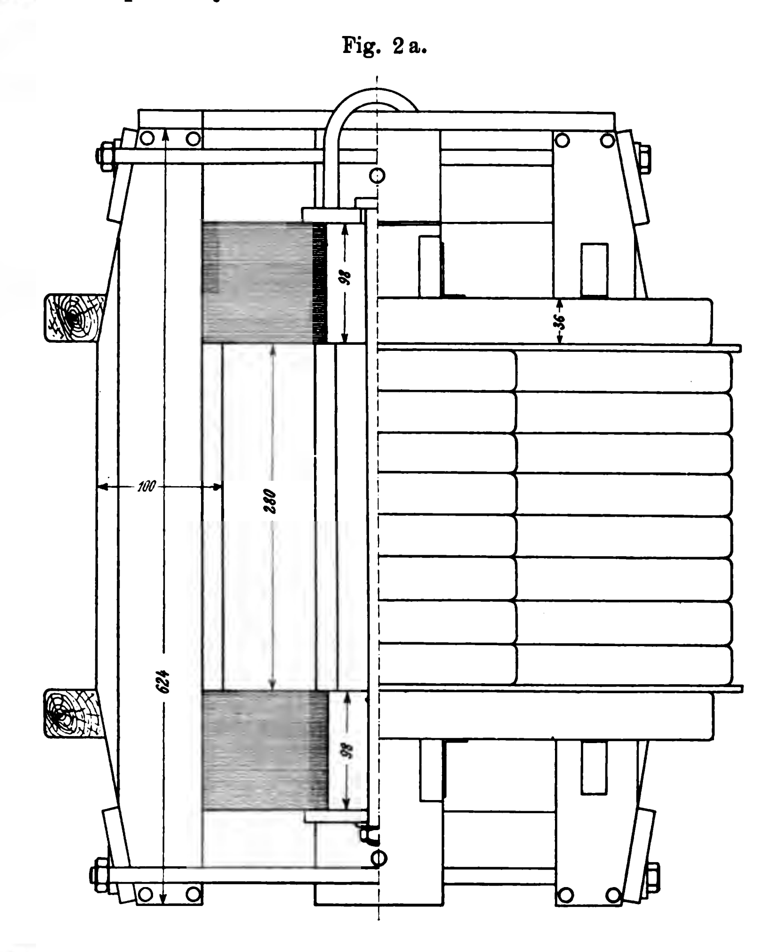
Schaltungsschema des polycyklischen Zwei- und Einphasensystems.

genügen, das Prinzip des Systems in aller Kürze zu erläutern; dabei soll nur das sogenannte unabhängige System berücksichtigt werden, da einerseits die Eigentümlichkeiten des abhängigen Systems sich einwandsfrei nur an einem fertigen Leitungsnetz prüfen lassen, andererseits die Einfachheit der Anordnung den Verzicht auf eine experimentelle Untersuchung rechtfertigt.

Der Zweck beider Systeme ist die gleichzeitige Uebertragung zweier Wechselströme verschiedener Periodenzahlen (wie sie für Licht-

und Kraftbetrieb zweckmässig erscheinen) durch ein Leitungsnetz und Trennung derselben an der Verbrauchsstelle. Als Beispiel für die Erläuterung wählen wir ein zweiphasiges (genauer vierphasiges) Grundsystem mit geringer Periodenzahl für Kraftbetrieb und ein superponiertes Einphasensystem mit höherer Periodenzahl für Beleuchtung.

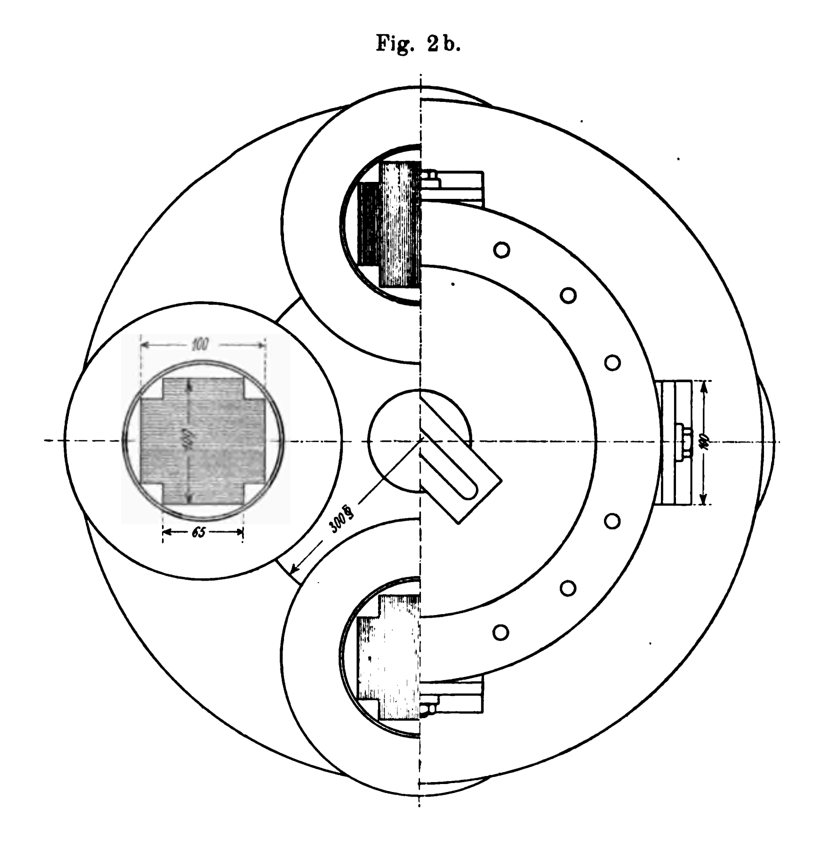
Fig. 2 a.



In Fig. 1 stellen zunächst A_I, A_{II} die zwei Phasen eines Generators, B_I, B_{II} und C_I, C_{II} die primären und sekundären Wickelungen eines Transformators dar; derselbe sei viersäulig angeordnet, wie es die Fig. 2a und 2b angeben, und die gegenüberliegenden Säulen zur gleichen Phase gehörig (man könnte ebenso gut z. B. auch vier gewöhnliche Einphasentransformatoren verwenden). Verbinden wir die Mitte der Wickelungen A_I, A_{II} und B_I, B_{II}, so wird in diesen Verbindungen

kein Strom fliessen; zwischen zwei solchen neutralen Punkten können wir also einerseits einen Einphasengenerator G einschalten, andererseits z. B. Lampen; der Strom hätte dabei die durch die Pfeile angegebenen Richtungen. Aus diesen folgt, dass die induzierende Wirkung des superponierten Stromes auf die Zweiphasensekundärwickelungen C_{I} und C_{II} sich aufhebt; dagegen ist es einleuchtend, dass sowohl im Zweiphasengenerator als im Transformator ein bedeutender induktiver Spannungs-

Fig. 2b.



abfall für den Einphasenstrom stattfinden muss. Dieser wird durch die Anordnungen D.R.P. 127792, 131550 aufgehoben. Die Wickelungen jeder Phase des Zweiphasengenerators wird in zwei Hälften $\overline{ab}$ und $\overline{cd}$ geteilt und diese beiden Hälften derartig gleichsinnig gewickelt, dass stets gleich viel Drähte beider Hälften in jeder Nut sich befinden; es tritt daher in jeder Nut die halbe Maschinenspannung zwischen den Drähten auf, sonst aber wirkt die Wickelung wie eine normale. Der Einphasenstrom aber durchfliesst je zwei Drähte einer Nut in entgegen-

gesetztem Sinne, wirkt also nicht magnetisierend und wird keinen nennenswerten Spannungsabfall erleiden.

Entsprechende Vorrichtungen lassen sich an Motorwickelungen und Transformatoren anbringen; nur wird man bei letzteren in Anbetracht der hohen Spannungen die Wickelung nicht ganz bifilar machen können, sondern die Spulen werden unterteilt, wie später erläutert werden wird; wünscht man die zwischen B_I und B_{II} bestehende Einphasenspannung noch zu transformieren, so steht der Einschaltung eines Einphasentransformators nichts im Wege. Man kann aber auch nach einem anderen Verfahren beide Ströme gleichzeitig transformieren, und zwar durch magnetische Verkettung in einem Eisenkern. Hierbei ist die Zweiphasenwickelung auf dem Transformator normal, es ist aber eine sekundäre Einphasenwickelung D aufgebracht, deren Wickelungssinn aus Fig. 1 ersichtlich ist: die Pfeile deuten die Richtung der Einphasenspannung an, während sich die Spannungen des Grundsystems in dieser Wickelung aufheben. — Für eine eingehende Orientierung über das System sei nochmals auf die erwähnte Litteratur verwiesen; hier soll nunmehr über die Versuche an einem Vierphasen-Einphasensystem berichtet werden.

Die experimentelle Untersuchung musste sich erstrecken auf die Brauchbarkeit der Trennungsanordnungen selbst, auf die gegenseitige Unabhängigkeit der Systeme und auf das Verhalten bei anormalen, aber möglichen Betriebsverhältnissen, auf Verluste und Wirkungsgrad. Es standen zwei Apparate zur Verfügung:

1. Ein viersäuliger Transformator für Vierphasen- und Einphasenstrom nach D.R.P. Nr. 127792.

2. Ein Vierphasenasynchronmotor mit Bifilarwickelung nach D.R.P. Nr. 131550.

Beschreibung der Maschinen und Apparate.

Als Vierphasengenerator dienten zwei durch eine verstellbare Scheibenkuppelung verbundene Einphasenmaschinen mit rotierendem Anker und feststehenden Polen, die von Gleichstrommotoren mittels Riemen angetrieben wurden. Die Wickelung ist eine sogenannte Kuchenwickelung, der Generator vierpolig angeordnet. Der Strom wird durch zwei Schleifringe abgenommen, während ein dritter Schleifring an die Mitte der Wickelung angeschlossen ist. Bei der nachträglichen Herstellung des dritten Schleifringes war bei keiner von beiden Maschinen genau die Mitte getroffen worden, wie folgende Tabelle zeigt:

	Gesamtspannung	Teilspannungen	
Maschine I . . .	100 Volt	49,5	50,5
Maschine II . . .	100 Volt	49,4	50,6

Infolge dieser Unsymmetrie konnte bei zweiseitiger Verkettung des Vierphasensystems ein Strom durch die Verkettungsleitungen (welche für den Einphasenstrom bestimmt sind) fliessen. Die Grösse dieses Stromes wurde zu 0,20 Amp. ermittelt, und zwar in einer Verkettungsleitung. Da dieser Strom gegen die Phasenströme etwa 45° Verschiebung haben wird, so wird er sich zu dem gemessenen Phasenstrom geometrisch addieren oder subtrahieren, aber nur mit seinem halben Betrage. Beim Leerlaufstrome des Transformators liegt der hierdurch verursachte Fehler von etwa 0,05 Amp. im Bereiche der Ablesungsfehler, wie bei den Messinstrumenten erläutert werden wird. Im Einphasenkreise ist der Betrag zwar doppelt so gross, dafür addiert er sich aber (wegen der mehrfachen Periodenzahl) quadratisch und ist vollständig zu vernachlässigen.

Die gegenseitige Phasenverschiebung der beiden E.M.Ke. der Maschinen konnte an einer an der Scheibenkuppelung angebrachten Teilung abgelesen werden. Zur Kontrolle der Richtigkeit wurde in den Kreis jeder Maschine eine Spule eines Spannungselektrodynamometers von Siemens & Halske geschaltet, nachdem durch passende Vorschaltung die Zeitkonstanten beider Kreise gleich gross gemacht waren. War nun der Ausschlag des Instrumentes 0, so war die Phasenverschiebung richtig. Die Genauigkeit dieses Verfahrens ist genügend gross, da eine Verdrehung der beiden Anker um 1 Bogengrad einen deutlichen Ausschlag nach der einen oder der anderen Seite hervorbrachte. Die Kurvenform der Maschinen ist

$$141{,}5 \sin(\omega t + 148^0) + 3{,}6 \sin 3\omega t + 3{,}6 \sin(7\omega t + 315^0).$$

Die Periodenzahl beträgt 33, bei welcher die Maschine eben noch bei Erregung mit 180 Volt die Spannung von 100 Volt bei Belastung abgeben konnte; sie wurde durch Vorschaltwiderstände und Nebenschlussregulatoren an den Gleichstrommotoren geregelt.

Zur Erzeugung des Einphasenstromes wurde eine Drehstrommaschine verwendet, von welcher zwei Phasen hintereinander geschaltet wurden, wodurch der stark ausgeprägte dritte Oberton herausfiel. Die Maschine ist eine Gleichpoltype mit beiden Wickelungen im festen Teil

und gestattete daher ohne weiteres eine Erhöhung der Periodenzahl auf 66. Sie war mechanisch unabhängig von der Zweiphasenmaschine, so dass ein ganz zuverlässiges Einregulieren auf die mehrfache Periodenzahl der Zweiphasenmaschine nicht möglich war. (Für die zunächst zu beschreibenden Versuche ist dieses aber ohne Bedeutung, da die beiden Systeme im Mittel doch gegeneinander wattlos sind; für die Untersuchung der Eisenverluste dagegen mussten gekuppelte Maschinen Verwendung finden, was sich für die kleinen Leistungen auch durchführen liess.) Die Kurvenform der Einphasenmaschine ist:

$$99 \sin(\omega t + 358^0) + 12{,}9 \sin(5\omega t + 169) + 5{,}6 \sin(7\omega t + 342^0).$$

Die verwendeten Instrumente waren ausnahmslos nach dem elektrodynamometrischen Prinzip ausgeführt, welches bei passender Ausführung Unabhängigkeit von der Periodenzahl und daher auch von der Kurvenform gewährleistet. Als Spannungsmesser diente ein Voltmeter des Westonschen Systems (in Verbindung mit einem Umschalter), dessen vorgeschalteter Bifilarwiderstand so gross ist, dass die Ablesungen bei Gleich- und Wechselstrom nur innerhalb der Ablesungsfehler liegende Abweichungen zeigen. Das Instrument hat zwei Messbereiche, bis 75 und bis 150 Volt, von welchen ersterer nicht bei hoher Periodenzahl benutzt wurde. Der Stromverbrauch des Instrumentes beträgt bei einem Widerstande von 2800 Ohm im Maximum etwa 0,06 Amp., bei 100 Volt nur 0,04 Amp. Da diese Voltmeter nicht für dauernde Einschaltung bemessen sind, wurde dieser Strom nicht in den Ampèremetern mitgemessen; die kräftige Luftdämpfung der Instrumente gestattet übrigens, die Werte sofort nach der Einschaltung abzulesen. Ausserdem wurde noch ein zweites gleiches Voltmeter mit 7 Volt Messbereich zur Bestimmung der Kurzschlussspannung des Transformators verwendet.

Die Ampèremeter waren Präzisions-Gleich- und Wechselstromampèremeter von Siemens & Halske mit selbstinduktionsfreiem Shunt, wie sie in der E.T.Z. 1900, S. 891 beschrieben sind, mit je zwei Messbereichen. Die Ablesungen sind von 10% des Messbereiches an brauchbar; zur Verfügung standen Instrumente bis 2,5 und 5 Amp., 12,5 und 25 und 50 und 100 Amp. Die Instrumente waren (ebenso wie die Wattmeter) so weit voneinander entfernt aufgestellt, dass eine gegenseitige elektrodynamische Beeinflussung, gegen welche besonders das Voltmeter sich empfindlich zeigte, nicht stattfand, ebenso waren die Zuführungsdrähte parallel geführt. Die Wattmeter waren von Siemens & Halske nach der in der E.T.Z. 1899, S. 665 beschriebenen Ausführung mit einem Messbereich bis 25, resp. 50 Amp. durch Reihen- und Parallelschaltung

der Starkstromwindungen. Vor die Spannungsspulen mit 1000 Ohm Widerstand wurden noch 4000 Ohm vorgeschaltet, so dass bei 100 Volt der Strom 0,02 Amp. war. Die Schaltung wurde in der Weise ausgeführt, dass stets der Effekt in der Spannungsspule mitgemessen, wobei die Korrektur vernachlässigt wurde. Das Stephansche Korrektionsglied wegen der Phasenverschiebung im Spannungskreise ist sogar beim Leerlauf des Transformators bei der Grösse des Vorschaltwiderstandes vollständig ausserhalb des Bereiches der Beobachtungsfehler. Ausserdem kamen noch Westonwattmeter mit Kompensationsspulen für den Effekt in der Spannungsspule mit Messbereich für 10 oder 20 und 2 bis 4 Amp. zur Verwendung bei der Messung der Eisenverluste.

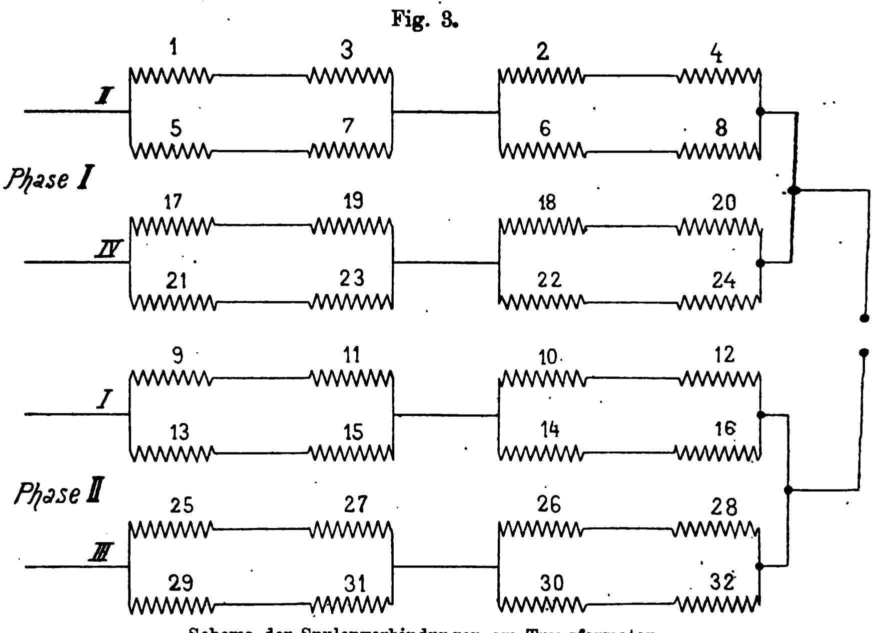
Die Genauigkeit sämtlicher Messungen wurde beeinträchtigt durch den Riemenantrieb der Dynamos, da die Riemennähte beim Passieren der Scheibe ein Zucken der Instrumente verursachten, so dass die Schätzung von Bruchteilen der Skalenteile unsicher war. Ausserdem zeigten einzelne Ampèremeter bei 33 ∾ eine Erscheinung, die auf Resonanz des beweglichen Systems zurückgeführt werden muss; bei dieser Periodenzahl zitterte der Zeiger so stark, dass er einen halben Skalenteil zu bedecken schien, und nur aus den erkennbaren Endlagen liess die Mittelstellung sich abschätzen. Aus diesen Gründen wurden die obigen Korrekturen, welche nur eine scheinbare Erhöhung der Genauigkeit bewirkt hätten, nicht berücksichtigt, da es ja auch nicht auf derartig genaue Kenntnis der Werte der vorliegenden Typen, als auf Feststellung ihrer allgemeinen Eigenschaften ankam. Die Touren wurden mit einem Tachometer von Horn gezählt, welches des öfteren mit Tourenzähler nachgeaicht wurde. Sämtliche Instrumente wurden vor und nach den Versuchen mit den Normalinstrumenten des Instituts geaicht, und zwar mit Gleichstrom und Kommutierung, um den Einfluss des Erdfeldes auszuschalten.

Der polycyklische Transformator.

Beschreibung. Die allgemeine Anordnung des polyclyklischen Ein- und Vierphasentransformators geht aus der Zeichnung Fig. 2a und 2b, aus welcher alles Nebensächliche fortgelassen ist, hervor. Er ist für eine Leistung von 10 Kilowatt bestimmt, 5 für jedes System. Alle Primärspannungen betrugen 100 Volt, die Ströme je 25 bezw. 50 Amp. Das Schaltungsschema ist in Fig. 3 wiedergegeben, wobei die Zahlen an den Spulen deren Reihenfolge auf den einzelnen Säulen darstellen; diese eigenartige Verbindung ist deshalb gewählt, um durch einfache

Umschaltung diesen Transformator in eine für den superponierten Strom bifilare Drosselspule umwandeln zu können. Die Windungszahlen des Transformators sind, wenn wir den primär wegen der Art der Verkettung eigentlich als Vierphasentransformator zu betrachtenden

Fig. 3.



Schema der Spulenverbindungen am Transformator.

Apparat, der Einfachheit und Uebereinstimmung mit dem sekundären Teil wegen, als Zweiphasentransformator bezeichnen:

Zweiphasig primär $N_{I_1} = N_{II_1} = 128$,
„ sekundär $N_{I_2} = N_{II_2} = 126$,
Einphasig primär $N_{1_1} = 128$,
„ sekundär $N_{1_2} = 192$.

Der gesamte Eisenquerschnitt einer Säule beträgt 77,5 qcm, woraus sich bei einer Periodenzahl von $c_I = 33$ eine Induktion ergibt

$$B_I = \frac{E \cdot 10^8}{4{,}44 \cdot c \cdot N \cdot F_e} = 6900.$$

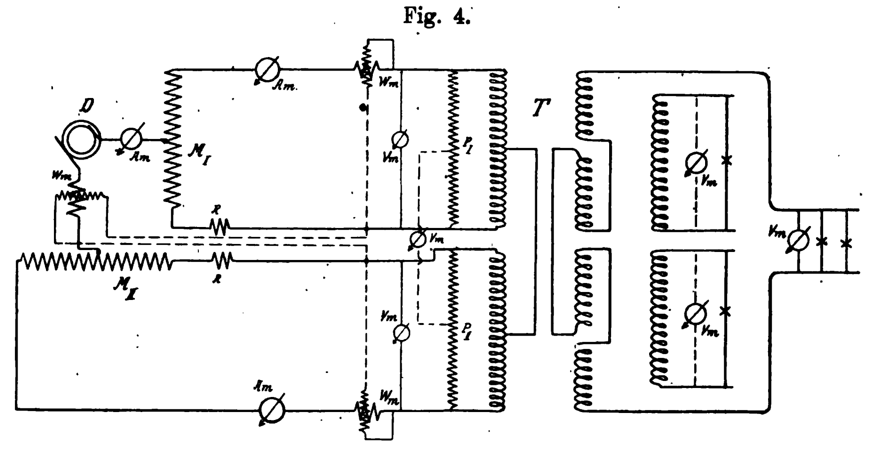
Für den Einphasenstrom sind zwei Leiter zu 128 Windungen parallel und auf verschiedene Eisenkerne gewickelt, so dass die Induktion in jedem bei $c_1 = 66$ betragen muss

$$B_1 = 3450.$$

Diese Maximalwerte werden zeitlich mehr oder weniger abweichen und werden infolgedessen die Eisenverluste und damit den Jahreswirkungsgrad beeinflussen. Diese Wirkung lässt sich natürlich nur untersuchen mit starr gekuppelten Maschinen und wird später besprochen. Hier soll zunächst das allgemeine Verhalten des Transformators geprüft werden. Er wurde daher getrennt als Zweiphasen- und Einphasentransformator untersucht und dann als polycyklischer.

Schaltung. Die bei diesen Versuchen benutzte Schaltung ist in Fig. 4 dargestellt. Darin bezeichnen M_I und M_{II} die beiden Wickelungen des Zweiphasengenerators, D diejenige des Einphasengenerators, während T den Transformator mit seinen drei Wickelungen darstellt. Die mit P_I und P_{II} bezeichneten Linien deuten zwei bifilare Wider-

Fig. 4.

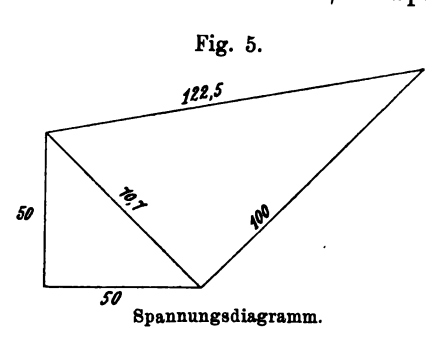


Schaltungsschema zur Untersuchung des polycyklischen Transformators (T).

stände von 1000 Ohm an, welche zur Herstellung eines neutralen Punktes dienten, um es zu ermöglichen, die Spannungen im superponierten System unabhängig von der Spannung im Grundsystem messen zu können. Denn die direkt zwischen zwei Leitern verschiedener Phase gemessene Spannung ist eine Resultierende, welche sich (bei Sinusform) aus dem Diagramm Fig. 5 ergibt. Die beiden mit 50 bezeichneten Seiten in der Figur stellen die halben Spannungen je einer Phase des Grundsystems dar, die Hypothenuse des Dreiecks 70,7 demnach die Spannung zwischen zwei Leitern verschiedener Phase ohne Vorhandensein der Einphasenspannung; diese ist wegen ihrer Periodenzahl gegen erstere wattlos, also wird der Effektivwert der resultierenden Spannung durch die Strecke 122,5 dargestellt werden. Zwischen den Mitten der Widerstände kann dagegen eine Spannung der geringeren

Periodenzahl nicht bestehen; legt man daher zwischen diese Punkte ein Voltmeter, so wird es nur die superponierte Spannung anzeigen; allerdings wird der Vorschaltwiderstand bei nicht elektrostatischen Instrumenten eine Reduktion notwendig machen. Ausserdem bietet diese Anordnung noch den Vorteil, dass man den Mittelwert der Spannung zwischen den parallelen Leitern des Einphasenstromes bekommt. Trotzdem wird auf gleiche Widerstände der beiden parallelen Leiter zu achten sein, um bei Messungen Fehler nicht nur in den Strömen, sondern auch in den Wattablesungen des Grundsystems zu vermeiden. Die Stromspulen der betreffenden Wattmeter werden nämlich vom kombinierten Strom durchflossen, die Spannungsspulen dagegen nur von der Spannung des Grundsystems beeinflusst, so dass infolge einer bekannten Eigenschaft elektrodynamometrischer Wattmeter dieselben nur die Leistung des Grundsystems anzeigen. Tritt dagegen infolge der Ungleichheit der Widerstände der parallelen Leiter auch eine Spannung von der superponierten Periodenzahl an den Klemmen der Spannungsspule auf, so werden die Ausschläge einen mit dem superponierten Strom quadratisch wachsenden Fehler zeigen. Da ein derartiger Fehler gerade bei den vorliegenden Unabhängigkeitsuntersuchungen zu vermeiden war, ist bei allen Versuchen sorgfältig auf gleiche Widerstände abgeglichen worden, was durch Spannungsmessungen kontrolliert wurde.

Fig. 5.



Spannungsdiagramm.

Dabei war die Gleichheit aller Spannungen zwischen je zwei Leitern verschiedener Phase bei unerregtem Zweiphasen- und belastetem Einphasensystem ein genügendes Kriterium; ausserdem konnte es noch durch direkte Messung der Spannungsdifferenz zwischen den parallelen Leitern mit einem empfindlichen Voltmeter geprüft werden oder praktisch am einfachsten durch Belasten des superponierten Kreises bei ruhendem Grundsystem und Beobachten der betreffenden Wattmeter. Diese Bedingung der Gleichheit der Widerstände ist bei allen Versuchen erfüllt gewesen, auch wo es weniger wichtig war, z. B. bei den geringen Leerlaufströmen des Transformators. Daher konnte auch die Spannungsspule des Einphasenwattmeters direkt an zwei beliebige primäre Klemmen des Transformators gelegt werden. Beim vorliegenden Fall hatten die (hier bifilaren) Widerstände Beträge von 1000 Ω, der Voltmeterwiderstand einen solchen von 2800, die Ablesungen waren demnach mit

$\frac{3300}{2800} = 1{,}178$ zu multiplizieren, was bei den angegebenen Werten schon stets geschehen ist. Von den Wattmeterablesungen für das Grundsystem waren wegen der Widerstände stets 10 Watt (bei 100 Volt) abzuziehen, während bei den Ampèremetern 0,1 Amp. von der 33periodigen Wattkomponente des Stromes abzuziehen war; entsprechend der erläuterten Genauigkeit der Versuche wurde die Korrektur angebracht, solange ihr Betrag für den ganzen Strom nicht unter 0,05 Amp. sank.

Bei den ersten Versuchen zeigte der Transformator das merkwürdige Verhalten, dass seine anfangs normalen Leerlaufverluste rasch zunahmen, um nach einigen Stunden fast die halbe normale Leistung als Leerverluste zu verzehren, wobei seine Temperatur über 100° stieg. Es zeigte sich, dass Wirbelströme an den nicht isolierten Stossfugen und in den Bolzen den Grund bildeten: der Kontakt an den Fugen wurde offenbar durch die Erwärmung und das Ausschmelzen des vorhandenen Lacks ein stets innigerer. Es wurden daher nachträglich die Fugen mit paraffiniertem Papier ausgelegt und die Bolzen isoliert; trotzdem zeigten sich noch geringe Variationen und die Wirbelstromverluste sind relativ hoch; ohne vollständigen Neuaufbau des Transformators liess sich jedoch der Fehler nicht gründlicher abstellen.

Leerlaufversuch. Der Leerlauf wurde nun zunächst für den Zweiphasentransformator geprüft und ergab:

E_I	J_I	W_I	$\cos \varphi_I$	E_{II}	J_{II}	W_{II}	$\cos \varphi_{II}$	c
100	2,60	109	0,419	100	2,6	111	0,446	33

Darin bedeuten E, J, W: Spannung, Strom und Watt, c die Periodenzahl, während die römischen Indices sich auf das Grundsystem, die arabischen auf das superponierte System beziehen. Die Ungleichheit in beiden Phasen ist auf Mängel der Probeausführung, z. B. kleine Ungleichheiten im Luftspalt an der Stossfläche der Bleche zurückzuführen. Als Einphasentransformator gab es folgende Werte:

E_1	J_1	W_1	$\cos \varphi_1$	c_1
100	2,8	128	0,458	66

Die geringeren Verluste sind auf die geringere Induktion trotz höherer Periodenzahl zurückzuführen. Der polycyklische Versuch ergab:

E_I	J_I	W_I	E_{II}	J_{II}	W_{II}	c_I	E_1	J_1	W_1	$\cos \varphi_1$	c_1
100	2,85	**104**	100	2.8	**107**	33	100	2,65	**101**	0,408	66

Die Werte von J_I und J_{II} sind kombinierte Ströme von beiden Periodenzahlen, stellen somit den Effektivwert des wirklich fliessenden Stromes dar. Der Leistungsfaktor des Grundsystems wird dagegen nicht mehr ohne weiteres angegeben werden können, es sei denn, dass man die Ströme als sinusförmig annimmt. (Mit Hilfe polycyklischer Stromtransformatoren wird es möglich sein, die einzelnen Ströme zur Messung zu trennen.) Der gesamte Wattverlust ist geringer als die Summe der Verluste bei Einzelbetrieb. Die gefundenen Werte sind jedoch Mittelwerte, denn bei polycyklischem Betriebe schwankten die Messinstrumente hin und her und das Verhältnis der Touren liess sich nicht genügend genau regulieren, um den Fehler dauernd zu beseitigen.

Diese Schwankungen werden hauptsächlich von der momentanen Lage der beiden Kurven und der damit veränderlichen Maximalinduktion abhängen und sind nur mit starr gekuppelten Maschinen zu untersuchen.

Das Uebersetzungsverhältnis wurde experimentell zweiphasig zu $a_I = 100 : 98{,}1$, einphasig zu $a_1 = 100 : 150$ gefunden.

Kurzschlussversuch. Zur weiteren Untersuchung wurde der Transformator kurzgeschlossen; die Schaltungsanordnung blieb dabei unverändert, nur wurden Instrumente mit anderem Messbereich und die Wattmeter ohne Vorschaltwiderstände benutzt. Für die Spannungsmessung am neutralen Punkte wurden die Widerstände auf 100 Ω gebracht, entsprechend dem geringeren Widerstande des Voltmeters bis 7 Volt, das zur Verwendung kam.

Der Versuch als Zweiphasentransformator ergab folgende Werte:

E_I	J_I	W_I	E_{II}	J_{II}	W_{II}	c_I
4,06	24,9	**70**	4,09	24,9	**70**	33

Daraus ergibt sich angenähert (ohne Berücksichtigung des Leerstromes und des Eisenverlustes) der effektive Widerstand pro Phase auf die primäre Wickelung reduziert zu

$$R_{I_1} + a_I^2 R_{I_2} = \frac{W}{J_I^2} = 0{,}113\ \Omega.$$

Der direkt mit Gleichstrom aus Strom und Spannung gemessene Widerstand beträgt für das Mittel beider Phasen bei der gleichen Temperatur von 35° primär 0,055 Ω, sekundär 0,05, also auf primär reduziert $0{,}050 \left(\frac{100}{98{,}1}\right)^2 = 0{,}0521\ \Omega$. (Die Einzelwerte sind primär $R_{I_1} = 0{,}0552$, $R_{II_1} = 0{,}0548$, sekundär $R_{I_2} = 0{,}0500 = R_{II_2}$.)

Der gesamte Widerstand 0,1071 Ohm weicht von dem effektiven verhältnismässig wenig ab, was auf die Abwesenheit fester Eisenmassen und auf die sehr geringe Impedanzspannung zurückzuführen ist, bei welcher alle vom Hauptkraftflusse herrührenden Eisenverluste fast verschwinden. Die entsprechenden Werte für den Einphasentransformator sind:

E_1	J_1	W_1	c_1
6,40	50	150	66

Der effektive Widerstand ergibt sich daraus zu $\frac{150}{50^2} = 0{,}060$ Ohm. Der Ohmsche Widerstand ist primär bei 35° 0,028, sekundär 0,064 oder auf primär reduziert $\left(\frac{100}{150}\right)^2 0{,}064 = 0{,}0284$, d. h. die Summe 0,0564 Ohm. Die grössere Abweichung erklärt sich ohne weiteres aus der grösseren Periodenzahl und Spannung. Bei der Ausführung des gleichen Versuches für polycyklischen Betrieb zeigten sich nur ganz unwesentliche Abweichungen:

E_I	W_I	E_{II}	W_{II}	c_I	E_1	J_1	W_1	c_1
4,09	70	4,12	70	33	6,43	50	159	33

Die Ströme J_I und J_{II} (kombiniert) konnten nicht gemessen werden, da der Messbereich der Ampèremeter mit 25 Amp. endigte und keine anderen von der Periodenzahl unabhängige vorhanden waren; es wurde daher auf gleiche Wattverluste die Spannung reguliert: da

aber $1^0 = 5$ Watt auf den Wattmetern war, so sind die Abweichungen von E_I und E_{II} im Bereich der Ablesungsfehler. Das gleiche gilt für den Einphasenstrom, bei welchem das Wattmeter $1^0 = 10$ Watt angab. Aus diesem Versuch kann vorläufig also nichts Gewisses bezüglich der völligen Unabhängigkeit gefolgert werden. Der Entwurf des Diagramms, welches bei den geringen Werten der Kurzschlussspannung zeichnerisch schwierig ist, wird sich dennoch empfehlen, um die Werte des Spannungsabfalles mit den direkt bestimmten vergleichen zu können. Dasselbe (Fig. 6) ist nach **Bragstad** (E.T.Z. 1900) entworfen für den

Fig. 6.

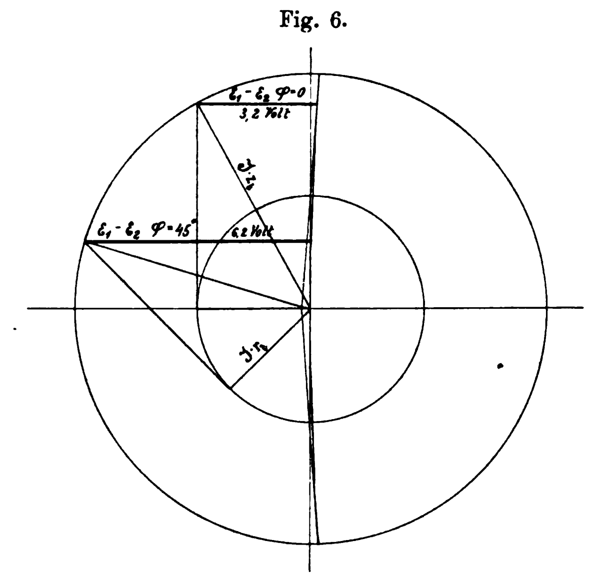


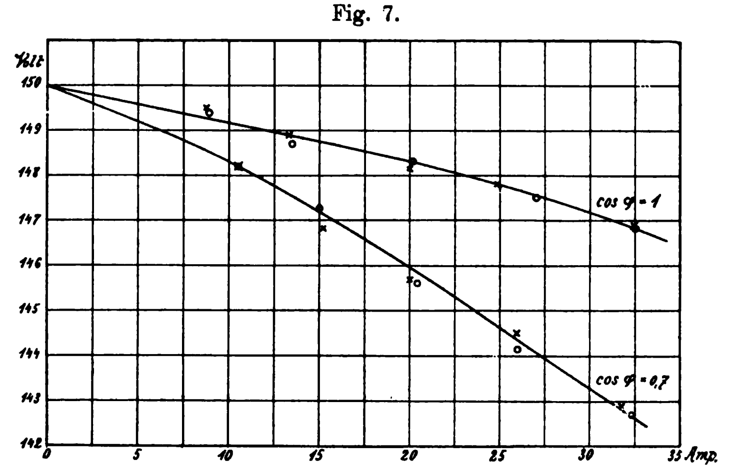
Diagramm des Einphasentransformators.

Einphasentransformator für den Maximalstrom von 50 Amp. primär. Der Spannungsabfall wurde in Wirklichkeit etwas grösser gefunden als sich aus dem Diagramm ergibt, besonders bei induktiver Belastung; abgesehen von dem Beobachtungsfehler erklärt sich das aus der Grösse des Leerlaufstromes, der beim Diagramm vernachlässigt ist, und bei 45^0 Phasenverschiebung natürlich mehr ins Gewicht fällt als bei induktionsfreier Belastung; unter Berücksichtigung dieser Umstände ist die Uebereinstimmung gut. Das gleiche gilt für den Zweiphasentransformator[1]).

[1]) Da die Kurzschlussspannung immer geringe Werte im Vergleich zur Klemmenspannung hat, so ist die Zeichnung des Kreises mit dem Radius E_k schwierig oder unmöglich. Man kann nun aus den gegebenen Grössen leicht die Tangenten des E_k-Kreises in den Schnittpunkten mit dem $J_z\,t$-Kreise berechnen; aus diesen zwei Tangenten lässt sich dann nach der bekannten einfachen Tan-

Direkte Messung. Nun wurden die Spannungsabfallkurven selbst direkt aufgenommen, und zwar für jedes System unter verschiedenen Belastungen des anderen: beim Spannungsabfall muss sich ja irgend eine Einwirkung, die nur eine Energieübertragung des einen Systems in das andere sein kann, bemerkbar machen. Für diese Bestimmung standen keine Apparate zur Verfügung, um eine Gegenschaltungsmethode auszuführen, so dass die ungenaue Differenzmessung der einzige Weg blieb. Es wurden aus diesem Grunde alle Versuche mehrmals durchgeführt und aus ihnen einzelne herausgegriffen und hier angegeben; wenn auch die Abweichungen bei einzelnen Versuchsreihen

Fig. 7.



Spannungsabfall des Einphasentransformators.

grössere Werte zeigten, so konnten doch aus keinem Versuche andere Schlussfolgerungen gezogen werden als hier geschehen ist. (Die aufgeführten Zahlen gehören zusammenhängenden Versuchsreihen an.) Das Schaltungsschema war noch immer das früher gegebene, dagegen liegen Ampèremeter und Wattmeter zweckmässigerweise nun sekundär.

Bei diesen Versuchen lag die Temperatur zwischen 30 bis 35°; dieselben wurden bei abnehmender Stromstärke gemacht, da die Temperatur sich dann während einer Versuchsreihe weniger ändert.

Es folgen nun die Versuchstabellen, die gleichzeitig durch Kurven veranschaulicht sind; in diesen bedeuten die Kreise die Werte bei unabhängigem, die Kreuze bei polycyklischem Betrieb. (Eine Ueberlastung gestattete die Grösse der Antriebsmotoren nicht.)

---

gentenkonstruktion ein Parabelbogen einhüllen, der in dem Intervall genügend genau mit dem Kreis übereinstimmt.

1a. Zweiphasig ruhend, einphasig induktionsfrei belastet (Fig. 7):

J_2	E_1	E_2	c
32,8	100	146,8	66
26,0	100	147,5	66
20,2	100	148,8	66
13,5	100	148,7	66
9,2	100	149,4	66
0	100	150,0	66

1b. Zweiphasig mit je 25 Amp. bei 100 Volt, einphasig induktionsfrei belastet.

J_2	E_1	E_2	c
32,8	100	146,9	66
24,9	100	147,8	66
20,0	100	148,1	66
13,3	100	148,9	66
8,7	100	149,5	66
0	100	150,0	66

2a. Zweiphasig ruhend, einphasig induktiv belastet.

E_1	E_2	J_2	$\cos \varphi_2$.	c_1
100	142,8	32,1	0,704	66
100	144,1	25,9	0,706	66
100	145,6	20,4	0,701	66
100	147,3	15,0	0,709	66
100	148,8	10,5	0,703	66
100	150,0	0	0	66

2b. Zweiphasig mit je 25 Amp., einphasig induktiv belastet.

E_1	E_2	J_2	$\cos \varphi_2$	c_1
100	142,9	31,6	0,706	66
100	144,5	26,0	0,703	66
100	145,8	20,0	0,703	66
100	146,8	15,2	0,709	66
100	148,2	10,5	0,704	66
100	150,0	0	0	66

Die induktive Belastung wurde hergestellt durch Parallelschalten von Glühlampen mit einer Drosselspule mit variablem Luftspalt; eine genauere Regulierung (die Abweichungen überschreiten übrigens kaum die Grösse der Messfehler) war nicht zu erzielen, doch beeinflussen solche kleine Aenderungen des cos φ den Spannungsabfall fast gar nicht. Vergleichen wir die aufgenommenen Werte miteinander, so sind Abweichungen nach beiden Seiten vorhanden, so dass diese Messung in ihren Grenzen Uebereinstimmung mit der Theorie ergibt.

Eine genauere Prüfung ergab folgender Versuch: es wurde die Einphasenbelastung unverändert gelassen und der Spannungsabfall in diesem Kreise als Funktion der variablen Belastung des Grundsystems aufgenommen; die Werte sind:

E_1	E_2	J_2	cos φ_2	c	J_I und J_{II}
100	146,8	15,1	0,708	66	25
100	146,8	15,1	0,708	66	18
100	146,8	15,1	0,708	66	12
100	146,8	15,1	0,708	66	4

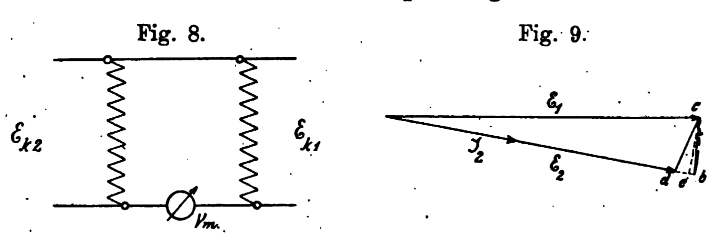
Da die beiden Maschinen von verschiedenen Akkumulatorenbatterien aus angetrieben wurden, brauchte an der Einphasenmaschine nichts reguliert zu werden, und die Messung konnte daher relativ sicher ausgeführt werden; dieser Versuch kann daher als beweiskräftig für die praktische Unabhängigkeit angesehen werden.

Trotzdem könnte noch eine Einwirkung bestehen, welche mit Hilfe dieser Versuche nicht feststellbar wäre; würde z. B. infolge mangelhaften Aufbaues der Transformatoren in der sekundären Einphasenwickelung eine Spannung von niedriger Periodenzahl induziert, so würde z. B. eine derartige Spannung von 5 Volt die vektorielle Spannungssumme von 150 noch nicht auf 150,1 Volt bringen. Nichtsdestoweniger sind Fälle denkbar, in welchen diese Verzerrung der Kurvenform im Sekundärnetz unerwünscht ist. Diese lässt sich jedoch leicht feststellen, indem man nur das Grundsystem erregt und den sekundären Einphasenkreis mit einem Ampèremeter kurzschliesst; jedoch war bei diesem Versuch keinerlei Ausschlag zu konstatieren, so dass damit die Unabhängigkeit des superponierten Systems vom Grundsystem als vollständig erwiesen betrachtet werden kann.

Es wird nun noch entsprechend das Grundsystem in Abhängigkeit vom superponierten zu prüfen sein, und zwar wieder durch Aufnahme des Spannungsabfalles. Eine Differenzmessung wird hier noch

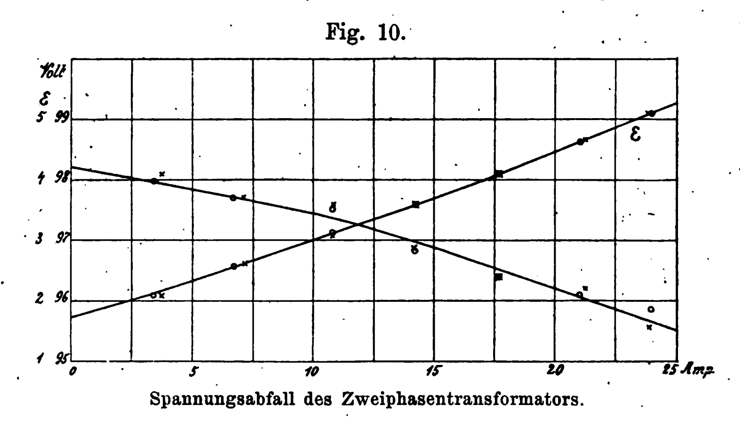
ungenauer als beim vorigen Versuch sein, denn die Differenzen sind, wenn auch nicht prozentual, so doch absolut kleiner und ihre Ablesung demgemäss (da die Skala, an der abgelesen wurde, bei 100 und 150 Volt keine sehr verschiedene Teilung zeigte) mit noch grösserem prozentualem Fehler behaftet. Da es bei diesen Versuchen aber weit weniger auf die absolute Grösse des Spannungsabfalles, als auf seine

Fig. 8. Fig. 9.



Unveränderlichkeit bei Variationen im superponierten System ankommt, so wird folgender Weg mit weniger Versuchen und grösserer Genauigkeit zum Ziel führen. Man schaltet (Fig. 8) für jede der beiden Phasen die primäre und sekundäre Wickelung gegeneinander und schliesst durch ein empfindliches Voltmeter. Wäre das Uebersetzungsverhältnis 1 : 1, so würde man direkt den vektoriellen Spannungsabfall messen.

Fig. 10.



Spannungsabfall des Zweiphasentransformators.

Im vorliegenden Fall sind die Verhältnisse weniger einfach und es ist daher das Spannungsdiagramm in Fig. 9 aufgezeichnet; E_1 und E_2 sind die Klemmenspannungen, J_2 der sekundäre Strom, der vektorielle Spannungsabfall beim Uebersetzungsverhältnis $a = 1$ ist $\overline{bc}$, während $\overline{cd}$ direkt gemessen wird; $\overline{bd}$ ist $E_1 - E_2$; ist nun $\overline{bd}$ klein im Verhältnis zu $\overline{cd}$, so wird jede Aenderung von $\overline{bc}$ sich durch eine solche von $\overline{cd}$ bemerkbar machen. Die Messung von $cd = \varepsilon$ wird also hier ihren Zweck erfüllen. Gleichzeitig mit dieser Grösse wurde auch noch

die Differenz der Spannungen unmittelbar abgelesen. Diese Versuchsergebnisse bei induktionsfreier Belastung gehen aus folgenden Tabellen und den Kurven Fig. 10 hervor.

E_{I_1}	E_{I_2}	J_{I_2}	ε	E_{II_1}	E_{II_2}	J_{II_2}	ε	C
100	95,9	24,0	5,05	100	96,1	24,6	5,15	33
100	96,1	21,0	4,62	100	96,1	21,6	4,68	33
100	96,4	17,6	4,10	100	96,7	18,1	4,16	33
100	96,8	14,2	3,62	100	96,8	14,5	3,62	33
100	97,5	10,7	3,10	100	97,3	10,9	3,10	33
100	97,7	6,8	2,57	100	97,4	7,0	2,59	33
100	98,0	3,3	2,1	100	97,8	3,2	2,1	33
100	98,1	0	1,8	100	98,1	0	1,8	33

Einphasengenerator unerregt.

E_{I_1}	E_{I_2}	J_{I_2}	ε	E_{II_1}	E_{II_2}	J_{II_2}	ε	C
100	95,6	23,9	5,09	100	95,8	24,8	5,18	33
100	96,4	21,2	4,66	100	96,2	21,6	4,67	33
100	96,4	17,6	4,10	100	96,4	18,1	4,15	33
100	96,9	14,2	3,58	100	96,8	14,5	3,63	33
100	97,7	10,8	3,10	100	97,1	10,9	3,12	33
100	97,7	7,2	2,62	100	97,6	7,4	2,60	33
100	98,2	3,7	2,1	100	98,0	3,6	2,1	33
100	98,2	0	1,8	100	98,2	0	1,8	33

Einphasengenerator vollbelastet.

Damit ist die beiderseitige Unabhängigkeit vollständig erwiesen.

Eisenverluste im Transformator.

Wie schon früher erwähnt, sind die Eisenverluste bei polycyklischem Betrieb geringer als die Summe der einzelnen Verluste. Es ist jedoch bei den ersteren wahrscheinlich, dass sie von der gegenseitigen Lage der beiden Spannungskurven zu einander abhängen werden, da die Maxima der Induktion damit geändert werden. Bekanntlich sind ja, wie für symmetrische Kurven empirisch gefunden wurde, die Hysteresisverluste annähernd proportional

$$\eta \,.\, B^{1,6},$$

während die Wirbelstromverluste bei lamelliertem Blech unter einigen zulässigen Voraussetzungen berechnet werden können zu

$$\frac{4}{3} f^2 . c^2 . B^2 . d^2 \gamma . 10^{-7} \text{ Watt pro cm}^3,$$

wo f den Formfaktor, c die Periodenzahl, d die Blechdicke und γ die Leitfähigkeit des Eisens im absoluten Masse darstellt.

Beim Zweiphasensystem wird als superponiertes System in erster Linie die zweifache Harmonische, eventuell noch die dritte Harmonische in Frage kommen. Bei der zweifachen Harmonischen ist eine Abhängigkeit der genannten Verluste von der gegenseitigen Lage wohl zu erwarten, da in allen vier Säulen des Transformators die Kurvenform die gleiche ist, denn eine Verschiebung der zweifachen Harmonischen um 180°, bezw. der Grundwelle um 90° verändern die Kurvenform nicht. Bei der dritten Harmonischen dagegen ist die resultierende Form der induzierten Spannung in jeder Säule verschieden, und zwar so, dass in den beiden Säulen einer Phase der charakteristische Verlauf (spitz oder flach) gerade entgegengesetzt ist, während dann bei der anderen Phase Zwischenstellungen eintreten. Es wurden daher nur beim ersten Fall die Kurven genau aufgenommen, während beim zweiten nur der Unterschied zwischen polycyklischem und getrenntem Betrieb festgestellt wurde. Bei gleichem Effektivwert der pro Säule induzierten Spannung wird der Verlust auch noch abhängen von dem Verhältnis der beiden sie zusammensetzenden Spannungen; dieses Verhältnis wird allerdings nach anderen Rücksichten zu bestimmen sein. — Wenn wir die zweifache Harmonische verwenden, so haben wir es mit unsymmetrischen resultierenden Kurven zu thun, für welche die gewöhnlichen Vorausberechnungsarten der Eisenverluste versagen, sowohl für Hysteresis- als für Wirbelstromverluste. Die Hysteresisverluste sollen bei gleichem Effektivwert nur vom Mittelwert der E.M.K. abhängen, wie aus dem empirischen Gesetz, dass sie vom Maximalwert der Induktion abhängen, wie folgt abgeleitet wird:

$$e = -w \frac{dZ}{dt}$$

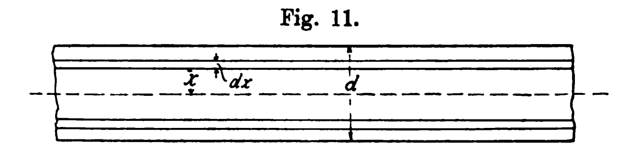
$$\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} e\,dt = \frac{2}{T} w \int_{+Z_{max}}^{-Z_{max}} -dZ$$

$$E_{mitt} = 4c . w . Z_{max}.$$

Beim Uebergang von e zu Z sind die Grenzen so angesetzt, dass das Positiv- und Negativmaximum von B gleich gross ist und um π

auseinander liegt, d. h. dass wir es mit einer Kurve ohne geradzahlige Harmonische zu thun haben. Sind solche vorhanden, so lässt sich keine allgemeine einfache Beziehung zwischen dem Maximalwert der Induktion und der E.M.K. aufstellen; es geht das schon daraus hervor, dass der arithmetische Mittelwert und damit der Formfaktor keine Bedeutung mehr haben können; denn der Mittelwert würde je nach den Endpunkten, zwischen welchen man ihn nähme, verschieden sein, und diese Endpunkte sind unbestimmt, weil im allgemeinen zwei Durchgänge durch 0 nicht um π auseinander liegen. Würde man auch den Mittelwert zwischen den Nullpunkten der Grundwelle nehmen, so wäre derselbe vom Wert der gradzahligen Harmonischen unabhängig (da diese, über 2π integriert, 0 ergeben würden), während dies für den Maximalwert der Induktion natürlich nicht gültig ist. Für die Hysteresisverluste fehlt demnach jede Grundlage zur Rechnung, während für die Wirbelstromverluste die Rechnung für die allgemeine

Fig. 11.



Fouriersche Reihe neu durchgeführt werden muss. Betrachten wir (Fig. 11) ein Blech von der Dicke d, die im Vergleich zur Länge zu vernachlässigen ist, und einen Streifen von der Dicke dx im Abstande x von der Mittellinie und berechnen die in demselben induzierte E.M.K. und daraus den Verlust. Die magnetisierende Wirkung des induzierten Stromes vernachlässigen wir, was bei kleiner Blechstärke zulässig ist. Die induzierte E.M.K. sei gegeben durch

$$e = E_1 \sin \omega t + E_2 \sin 2\omega (t + \tau_2) + E_3 \sin 3\omega (t + \tau_3) \ldots$$

Wenn B die Induktion, S den Eisenquerschnitt und w die Windungszahl darstellt, dann ist auch

$$e = - S \,.\, w \frac{dB}{dt},$$

d. h.

$$\frac{dB}{dt} = \frac{1}{S \,.\, w} (E_1 \sin \omega t + E_2 \sin 2\omega [t + \tau_2] + \ldots).$$

Im betrachteten Streifen ist die E.M.K., wenn l die Länge in Centimetern desselben ist,

$$\delta e = - 2 x l \frac{dB}{dt}.$$

Daraus das Quadrat des Effektivwertes:

$$\frac{1}{T}\int_0^T \delta e^2 \, dt = \frac{1}{(S w)^2} 4 x^2 l^2 \frac{1}{T}\int_0^T (E_1^2 \sin^2 \omega t +$$

$$+ 2 E_1 E_2 \sin \omega t \, . \, \sin 2\omega (t + \tau_2) + E_2^2 \sin 2\omega (t + \tau_2) \ldots)$$

Nun wird bekanntlich das Integral des $\sin^2$ über eine ganze Periode $^1/_2$, das Integral des Produktes zweier Sinus von der Form

$$\sin \omega t \, . \, \sin m \omega t$$

über eine ganze Periode Null. Der Effektivwert der E.M.K. in dem betrachteten Streifen von der Länge l ist also

$$\delta E = \frac{2 x l}{S \, . \, w} \sqrt{\frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + \ldots}$$

Wird die Leitfähigkeit des Eisens mit γ pro Kubikcentimeter bezeichnet und berücksichtigt, dass die selbstinduzierte Wirkung vernachlässigt ist, so ist der Effekt im Streifen im Abstande x

$$W_x = \frac{4 x^2 l^2}{S^2 \, . \, w^2} \gamma \frac{1}{2 l} \left(\frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + \frac{E_3^2}{2} + \ldots \right).$$

Der Effekt ist der Länge proportional, also ist er pro Centimeter Länge und Quadratcentimeter Querschnitt

$$W_{cm} = \frac{2 x^2}{S^2 w^2} \gamma \left(\frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + \ldots \right)$$

und der mittlere Effekt im ganzen Blech

$$W = \frac{1}{d} \int_0^{\frac{d}{2}} 2 x^2 \, dx \, . \, \frac{\gamma}{S^2 w^2} \left(\frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + \ldots \right)$$

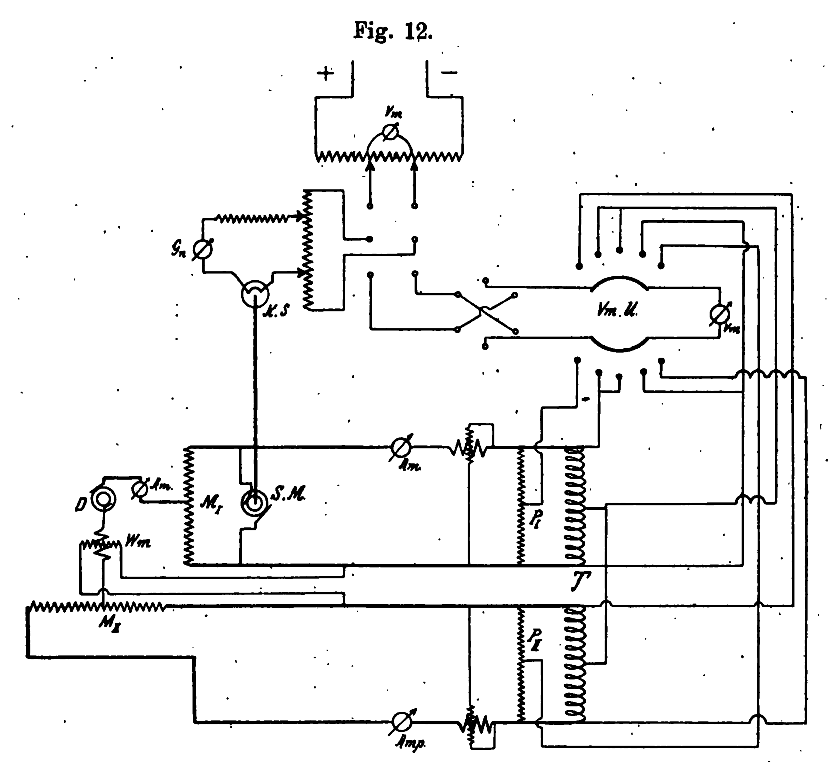
$$= \frac{1}{12} \frac{\gamma}{S^2 w^2} d^2 \left(\frac{E_1^2}{2} + \frac{E_2^2}{2} + \ldots \right) \text{ (C.G.S.-Einheiten !).}$$

Aus dieser Formel folgt, dass der Wirbelstromverlust, unter den gemachten Voraussetzungen, nur vom Effektivwerte abhängig sein müsste, d. h. in unserem speziellen Falle von der zeitlichen Lage der Kurven zu einander unabhängig, und gleich der Summe der getrennten Verluste. Dieses Resultat war auch zu erwarten, da bei Vernachlässigung der magnetisierenden Wirkung der Wirbelströme (Schirm-

wirkung) dieselben genau in der gleichen Weise induziert werden, wie die Haupt-E.M.K.

Die experimentelle Untersuchung für die zweifache Harmonische erstreckte sich auf Messung des Verlustes mit Wattmetern (getrennt und polycyklisch), ebenso wie bei den früheren Untersuchungen, Trennung derselben in Wirbelstrom- und Hysteresisverlust durch Variation

Fig. 12.



Schaltungsschema zur Untersuchung der Eisenverluste.

der Periodenzahl und Aufnahme der Strom- und Spannungskurven nach der Joubertschen Methode.

Das Schaltungsschema (Fig. 12) entspricht dem früher gegebenen, nur sind die Instrumente solche mit kleinerem Messbereich, und kommt die Vorrichtung zur Kurvenaufnahme hinzu. Die Generatoren für den Zweiphasenstrom waren die gleichen wie früher, während für den Einphasenstrom eine achtpolige Maschine von der alten Siemensschen Type diente; die Maschinen waren durch eine verstellbare Universalgelenkkuppelung verbunden, welche sich für die kleinen Leistungen genügend sicher an den freien Wellenenden hatte verschrauben lassen. Eine Ge-

lenkkuppelung war notwendig, weil beide Generatoren natürlich keine gemeinschaftliche Grundplatte besassen und der Boden des Maschinensaals zitterte, abgesehen davon, dass eine genaue Zentrierung unter diesen Umständen sehr schwierig war. Bei den Messungen wurde auf Gleichheit der Widerstände in den für den superponierten Strom parallelen Zweigen geachtet, und bei den Wattmeterablesungen die Verluste in den Spannungsspulen und in den Widerständen zum neutralen Punkte berücksichtigt, während das Voltmeter während der Ablesungen stets ausgeschaltet wurde.

Für die Kurvenaufnahme diente eine von einem Synchronmotor getriebene Joubertsche Scheibe in der von Franke gegebenen Modifikation (K.S in Fig. 12). Da sich in der Litteratur (vergl. Epstein auf der Jahresversammlung des Verbandes deutscher Elektrotechniker, E.T.Z. 1901, S. 767) die, im allgemeinen unwidersprochen gebliebene, Angabe vorfindet, es sei unmöglich, mit der Joubertschen Methode Kurven auf einige Prozent genau aufzunehmen, so wurde auf diese Aufnahme eine grössere Sorgfalt verwendet, als es die vorliegende Untersuchung unbedingt erforderlich machte. Da es gelang, Kurven aufzunehmen, bei denen die mittlere Abweichung vom wahrscheinlichsten Wert lange nicht 1 % war, so soll auf diese Kurvenaufnahme etwas näher eingegangen werden.

Es wurde zunächst eine Nullmethode angewendet, indem der Momentanwert der Wechselspannung durch eine gemessene variable Gleichspannung kompensiert wurde. Soll diese Methode genaue Werte geben, so ist eine hohe Empfindlichkeit des Galvanometers notwendig, damit auch geringe Spannungsdifferenzen trotz der kurzen Stromdauer zur Geltung kommen. Bei dieser Empfindlichkeit reagiert das Galvanometer aber schon auf Ströme, wie sie durch die Isolation gehen, da diese, denen die Kontaktscheibe nur als Widerstand gilt, dauernd wirken. Ist also die ganze Schaltung nicht vorzüglich isoliert, so erweist sich diese Methode als unbrauchbar, solange man die Gleichstromspannung am Spannungsteiler ändert, da sich damit im allgemeinen auch der Isolationsstrom und damit der neue Nullpunkt des Instrumentes ändern wird. Teilt man, um diesen Uebelstand zu vermeiden, die Wechselspannung mit einem bifilaren Widerstand und kompensiert auf diese Weise, so erscheint es möglich, mit einem neuen, bei ruhender Maschine festgestellten Nullpunkt zu arbeiten. Im vorliegenden Fall blieb aber auch so der Isolationsstrom, sobald die Maschinen einmal liefen, nicht konstant, auch nicht nach längerer Zeit. Deshalb wurde zur direkten Aufnahme übergegangen; es wurde aber eine Wippe eingeschaltet, die erlaubte, die ganze Aufnahmevorrichtung (Galvanometer

mit Widerständen und Scheibe) auf eine gemessene, variable Gleichspannung umzuschalten und so während der Messung jeden Ausschlag des Galvanometers direkt in Volt zu aichen. Als Galvanometer diente ein Millivoltmeter von Siemens & Halske mit Fadenaufhängung und einer Empfindlichkeit von 3,25 10^{-7} Amp. pro Teilstrich bei Dauerstrom. Um passende Ausschläge zu erhalten, wurde die Spannung an einem bifilaren Widerstand jeweils in geeignetem Verhältnis geteilt, während für die Spannungsmessungen noch 10000 Ohm dauernd vor dem Galvanometer blieben; die Spannungen brauchten nicht umgerechnet zu werden, da die gleiche Widerstandskombination an die direkt gemessene Gleichspannung angelegt wurde. Infolge der hohen Empfindlichkeit (relativ zu einem gewöhnlichen Millivoltmeter mit 10^{-3} Amp. pro Teilstrich, dessen Verwendung deshalb auch bedenklich erscheint) brauchen nur sehr geringe Ströme den Kontaktgeber zu passieren, wodurch jede Funkenbildung ausgeschlossen ist; noch wichtiger erscheint, dass ein hoher Widerstandsbetrag eingeschaltet werden kann, wodurch die stets veränderlichen Bürstenübergangswiderstände ausser Betracht kommen. Die wesentlichste Störungsursache, auf welche auch die Ungenauigkeit der meisten Messungen zurückzuführen ist, liegt im Zustande des Kontaktgebers. Konstruktiv ist zu beachten, dass nicht kurz vor dem Kontaktgeben die Bürsten bereits in Erschütterung versetzt werden, wie es bei mancher Konstruktion mit Ringen aus Metall beim Uebergang zum Isolierstück geschieht. Die hier verwendete Scheibe bestand aus Stabilit mit einem Messingeinsatz (für die einfache Joubertsche Scheibe ebenso anwendbar) und zeigte auch nach längerem Gebrauch keine ungleichmässige Abnützung. Bezüglich der Bürstenhalter erwiesen sich etwas schwerere besser als ganz leichte und als Bürstenmaterial bewährte sich flachgeschlagene Kupfergaze, zwischen Messingstreifen ein wenig vortretend, am besten; Bleche gaben öfters plötzliche Störungen, die nach einiger Zeit ebenso plötzlich wieder verschwanden, ohne sichtbaren Grund; am besten waren davon Neusilberbleche, solange sie noch einigermassen neu waren. Ob der Kontaktgeber schwach geölt war oder nicht, machte sich wenig bemerkbar. Dass die Bürsten den Kontaktgeber nicht zu schräge berühren dürfen, damit der Verschleiss den Augenblick des Kontaktes nicht verändert, und dass auch in dieser Beziehung grosse Umfangsgeschwindigkeit unzweckmässig ist, braucht nicht erwähnt zu werden. Bezüglich der eigentlichen Messung kann man zunächst feststellen, dass bei proportionaler Skala für Dauerstrom der Ausschlag bei diesen Verhältnissen langsamer wächst als die Voltzahl. Eine einmalige Aichung

genügt also nicht, es müsste wenigstens eine Kurve über die ganze Skala aufgenommen werden. Es zeigte sich aber, dass auch dieses

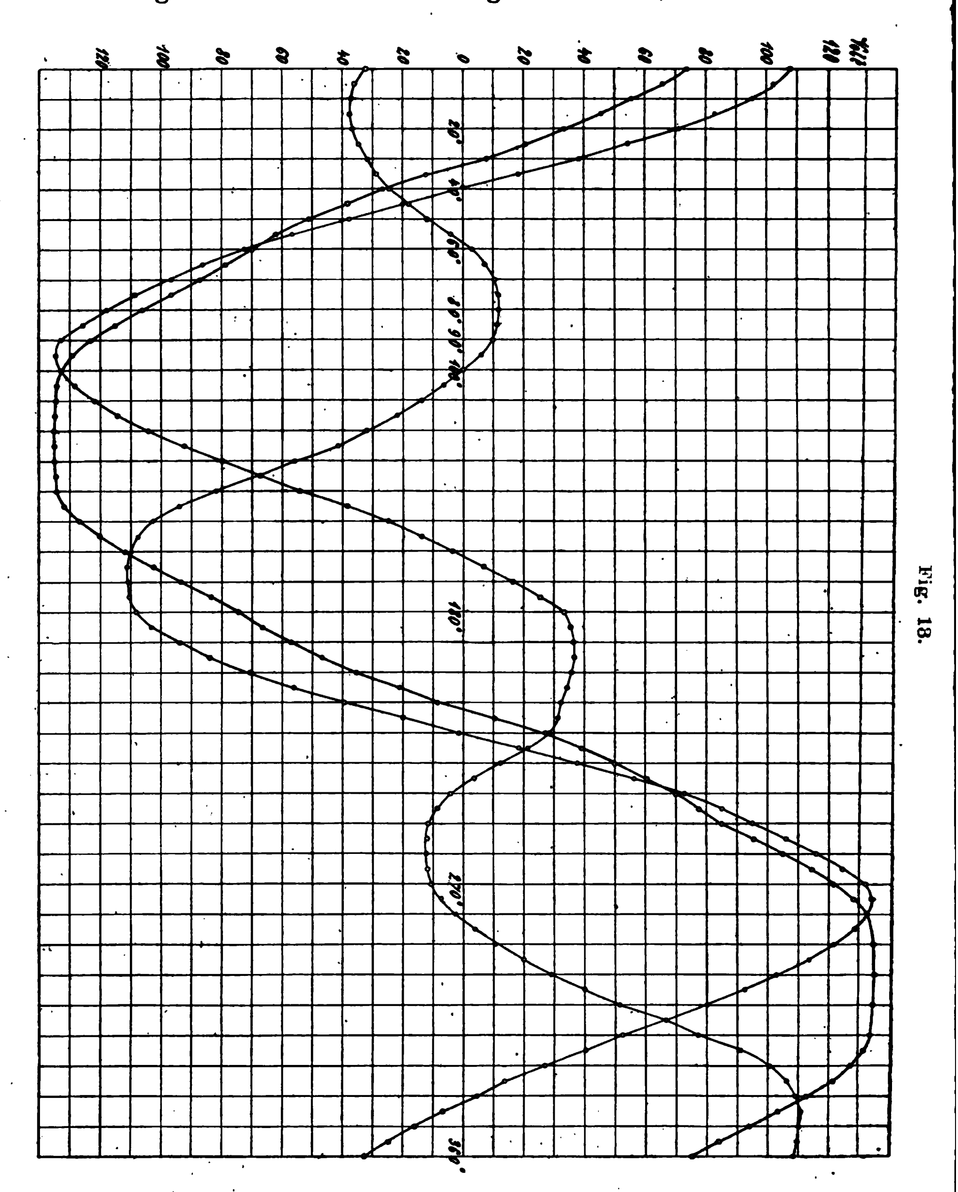


Fig. 18.

nicht genügt, denn derselbe Wert des Wechselstromes gab zu verschiedenen Zeiten um mehrere Prozent verschiedene Ausschläge, die aber der gleichen Gleichspannung entsprechen. Demnach muss sich,

durch Aenderung des Bürstenzustandes, die Kontaktdauer ändern, und man muss für jeden Wert möglichst rasch durch Umschalten den zugehörigen Gleichspannungswert suchen; nur wenn die Nadel keine Spur von Bewegung zeigt, genügt auch für ganz genaue Aufnahme die Aichung jedes zweiten oder dritten Wertes; eine grössere Schwankung der Nadel tritt häufiger ein, hört aber ebenso wieder auf, wenn der Kontaktgeber gut ist, während Schwankungen von Bruchteilen eines Teilstriches selten ganz verschwinden. Zur Kontrolle der so aufgenommenen Kurven wurden solche an beiden Säulen der gleichen Phase des Transformators und an den äusseren Klemmen dieser Phase aufgenommen; letztere muss die reine Zweiphasenspannung und gleich der Summe der Teilspannungen sein.

Diese Kurven sind in Fig. 13 wiedergegeben. Die Analyse nach Fourier ergab für die Grundwelle die Gleichung

$$141{,}5 \,.\, \sin(\omega t + 148^0) + 3{,}6 \sin 3\omega t + 3{,}6 \sin 7(\omega t + 45^0),$$

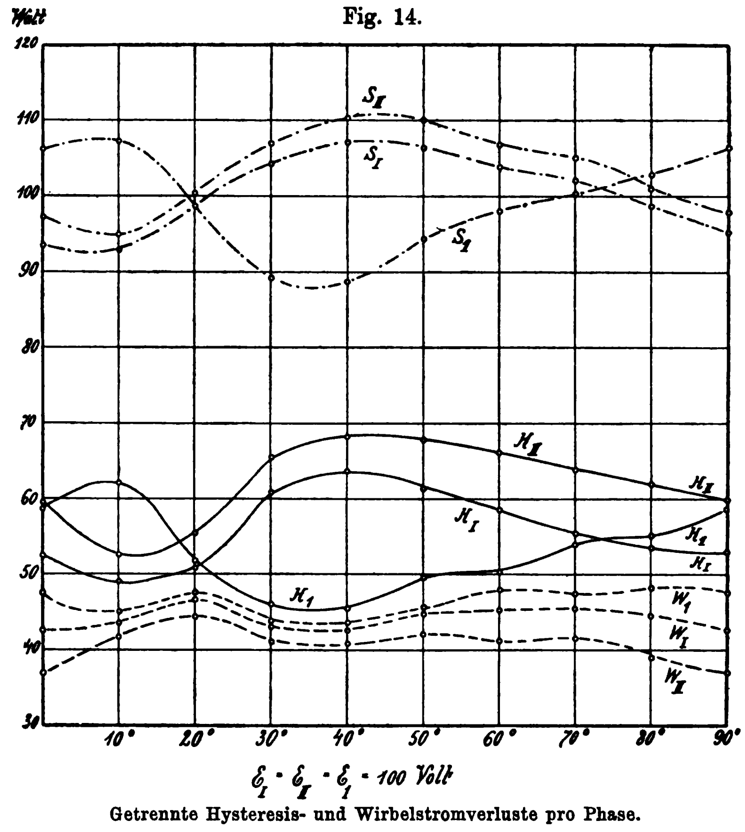
während die einphasige Maschine fast reine Sinusform ergab.

Gehen wir nun zu den eigentlichen Verlusten über, so sind dieselben aufgenommen für die gleiche resultierende Spannung von 70,8 Volt pro Säule, einmal 100 für Grundsystem und 100 für das superponierte (normal), dann 111 und 87,5 und endlich 84,0 und 115, da die Untersuchung einen möglichst allgemeinen Wert haben sollte und ein verschiedenes Verhalten bei verschiedenen Verhältnissen denkbar ist; dass die Gesamtverluste beim letzten Wert am geringsten sein werden, steht zu erwarten, denn der Transformator nähert sich hier mehr einem Transformator mit hoher Periodenzahl, der bekanntlich im gleichen Eisen weniger Verluste hat.

Die Hysteresisverluste wurden von den Wirbelstromverlusten getrennt nach der bekannten Methode der Variation der Periodenzahl; es werden als Funktion der Periodenzahl die Gesamtverluste pro Periode graphisch aufgetragen; die so erhaltenen Punkte müssen auf einer Geraden liegen, falls die obigen Gesetze für die Verluste richtig sind, und der Schnitt dieser Geraden mit der Ordinatenachse gibt die Hysteresisverluste pro Periode.

Die gefundenen Werte für polycyklischen Betrieb sind als Funktion der am Teilkreis der Kuppelung abgelesenen Winkel (auf eine zweipolige Maschine bezogen) aufgetragen in den Fig. 14 bis 19 und zwar in den drei ersten die einzelnen Verluste in jeder Phase, in den letzten die Summen der Hysteresis- und Wirbelstromverluste und im halben Massstabe die gesamten Verluste. H bezeichnet die Hysteresis-

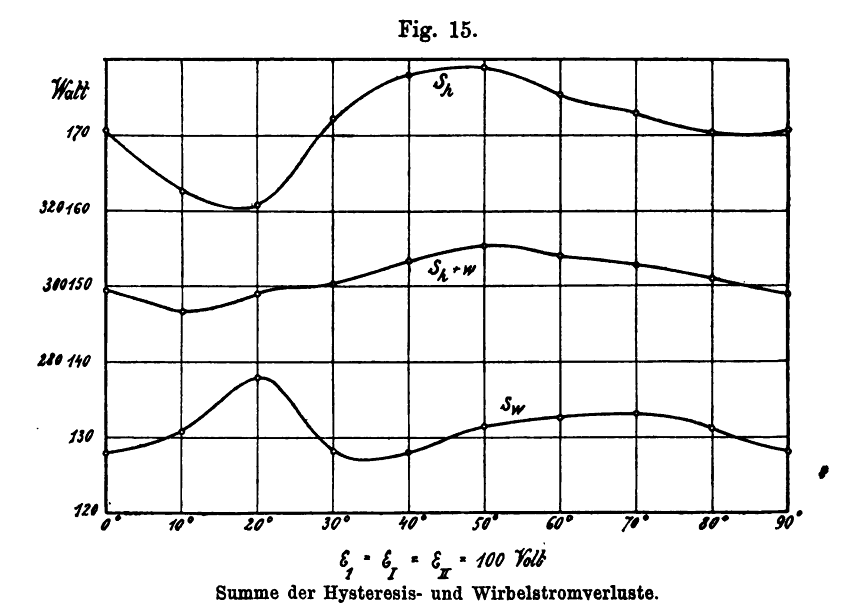
Fig. 14.



$\mathfrak{E}_I = \mathfrak{E}_{II} = \mathfrak{E}_1 = 100$ Volt

Getrennte Hysteresis- und Wirbelstromverluste pro Phase.

Fig. 15.

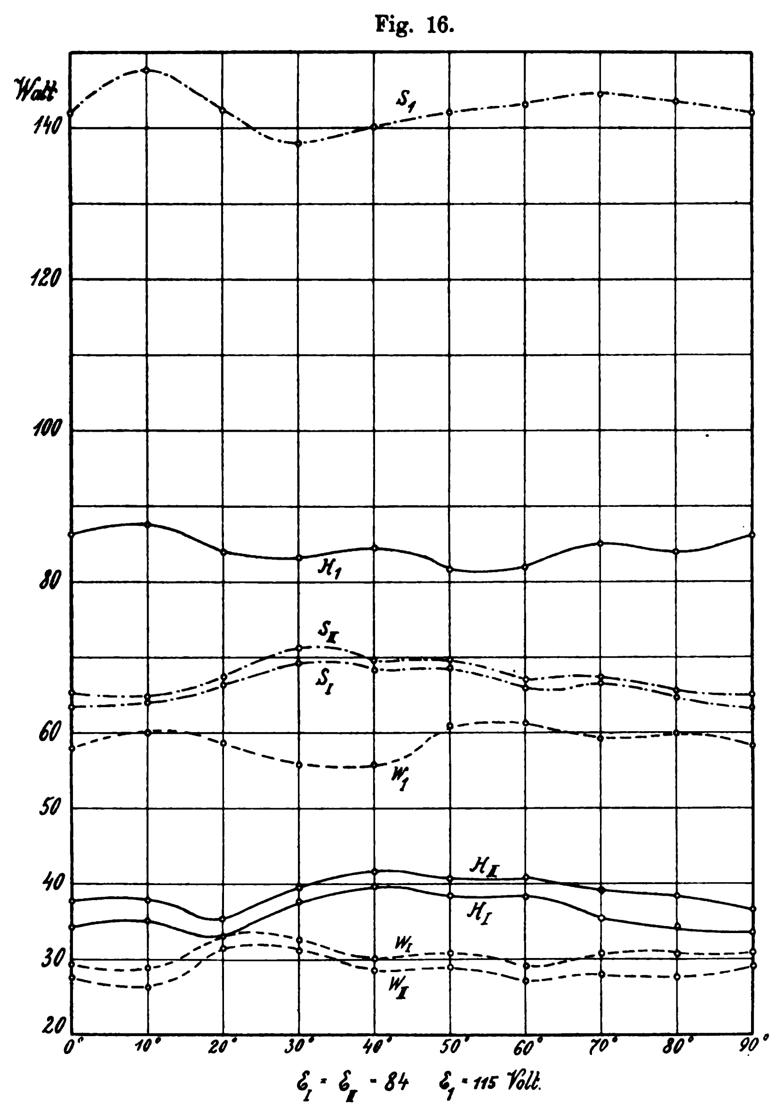


$\mathfrak{E}_1 = \mathfrak{E}_I = \mathfrak{E}_{II} = 100$ Volt

Summe der Hysteresis- und Wirbelstromverluste.

verluste, W die Wirbelströme, während S Summe bedeutet; die Indizes I und II beziehen sich auf das Grundsystem, 1 auf das superponierte. Wir betrachten zunächst genauer den Fall $E_1 = E_I = E_{II} = 100$ Volt.

Fig. 16.

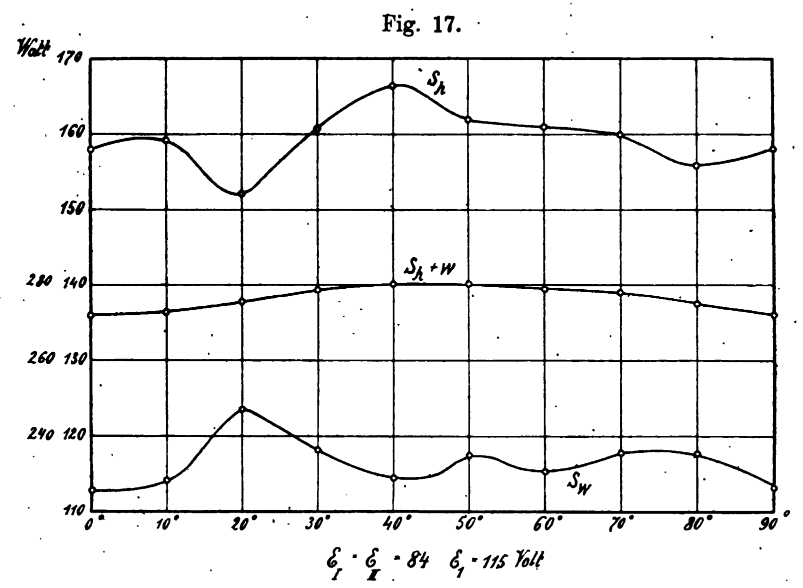


Getrennte Hysteresis- und Wirbelstromverluste pro Phase.

Für diesen Fall sind die Kurven aufgenommen bei den Winkeln von 10, 20 und 65°, und zwar für die Spannung an einer Säule, den verketteten Strom und den halben Strom der superponierten Phase allein

(Fig. 20 bis 22). Durch Analyse nach Fourier (graphische Methoden nur für symmetrische Kurven) wurde der Winkel der Phasenverschiebungen gegen den Nullpunkt gefunden. Die Spannungs- und Induktionsflusskurven wurden nun für die übrigen Winkellagen konstruiert, der Einfachheit halber unter Vernachlässigung der höheren Harmoni-

Fig. 17.



Summe der Hysteresis- und Wirbelstromverluste.

schen der Grundwelle, da diese den Charakter der Kurve nicht wesentlich beeinflussen (Fig. 23 bis 27).

Die Verluste bei getrenntem Arbeiten der beiden Systeme sind:

$E_I = E_{II} = E_1 = 100$ Volt:

$H_I = 62{,}6$	$W_I = 45{,}1$
$H_{II} = 68{,}3$	$W_{II} = 42{,}7$
$H_1 = 76{,}2$	$W_1 = 46{,}2$

$E_I = E_{II} = 111$ Volt; $E_1 = 87{,}5$:

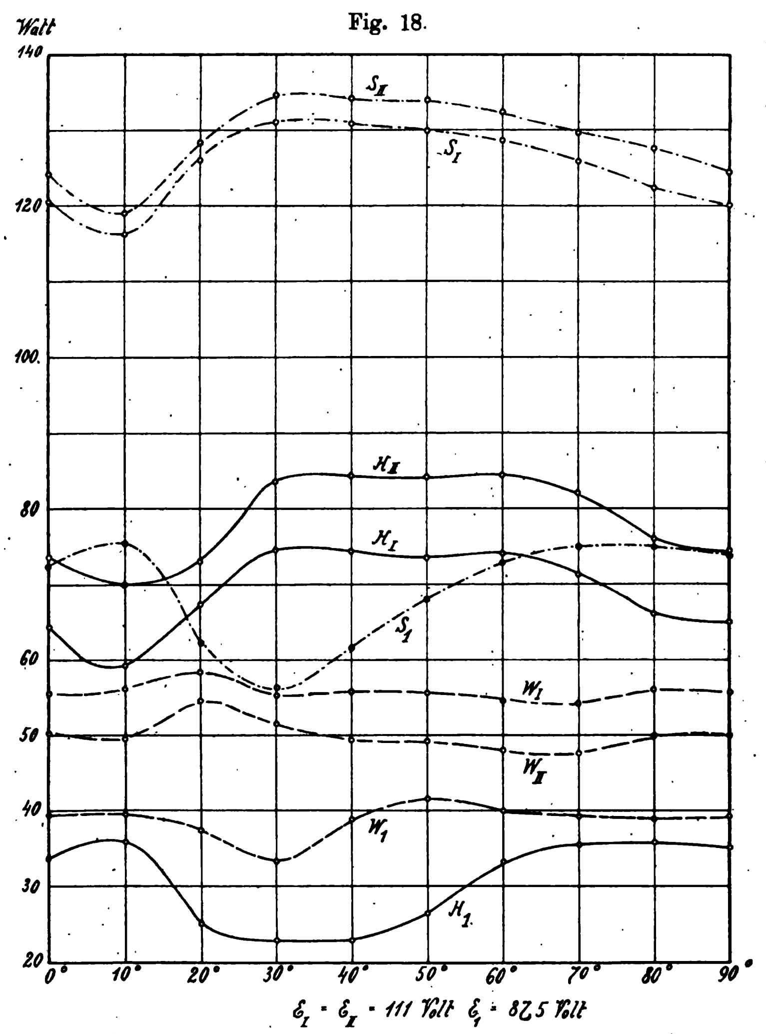
$H_I = 72{,}3$	$W_I = 57{,}8$
$H_{II} = 83{,}3$	$W_{II} = 50{,}2$
$H_1 = 62{,}0$	$W_1 = 37{,}2$

$E_I = E_{II} = 84$ Volt; $E_1 = 115$:

$H_I = 44{,}0$	$W_I = 35{,}3$
$H_{II} = 50{,}8$	$W_{II} = 30{,}0$
$H_1 = 91{,}5$	$W_1 = 65{,}2$

Betrachten wir nun die Form der Kraftflusskurven und den Verlauf der Verluste. Zunächst zeigt die Summe der Hysteresisverluste (Fig. 17) ein ausgesprochenes Minimum zwischen 10° und 20°, ein Maximum etwa bei 50°. Der erste Wert entspricht dem Fall, dass

Fig. 18.

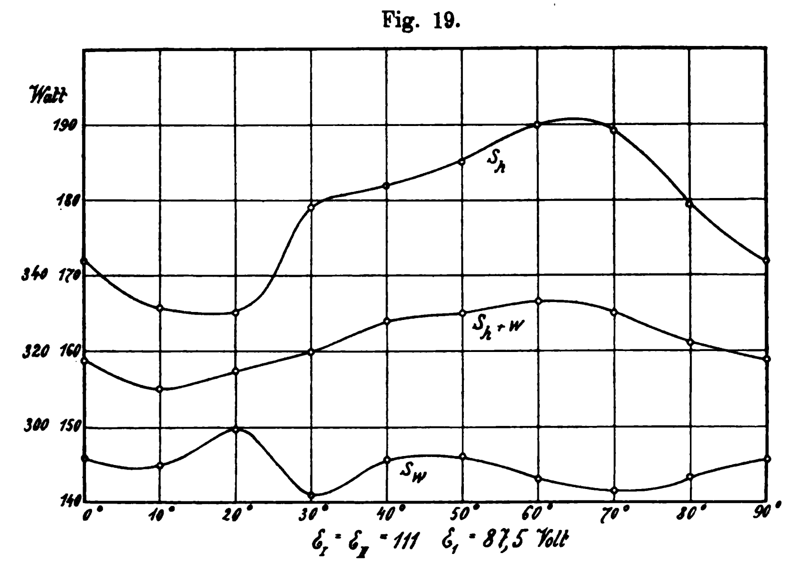


Getrennte Hysteresis- und Wirbelstromverluste pro Phase.

das einseitige Maximum der Kraftflusskurve am grössten ist (Fig. 24 und 25), während auf der anderen Seite sowohl Maximum als Ummagnetisierung geringer sind (Zeitdauer von $^2/_5$ Periode sehr geringe Induktionsvariation); bei $\backsim$ 50° dagegen sind die Maxima auf beiden

Seiten gleich gross, und wenn sie auch nicht die absolute Höhe des vorigen erreichen, so ist doch die Differenz ($B_{max}+$) — ($B_{max}-$) grösser als im vorigen Fall; ferner ist die Zeit, während welcher fast keine Induktionsänderung stattfindet, viel kürzer, nur etwa $^1/_5$ einer Periode. Man kann also sagen, dass es für die Hysteresisverluste mehr auf die gesamte Ummagnetisierung als auf den erreichten Höchstwert der Induktion ankommt, was auch den sonstigen bekannten Thatsachen entspricht. Zur Kontrolle wurde noch die statische Hysteresisschleife eines ähnlichen Eisens bei einem entsprechenden Ummagnetisierungsprozess aufgenommen; die Aufnahme beim Transfor-

Fig. 19.



Summe der Hysteresis- und Wirbelstromverluste.

mator selbst hätte erheblich mehr Umstände gemacht und doch nicht mehr Wert gehabt, da die Wechselstromhysteresisschleifen, wie besonders Wien nachgewiesen hat, stark von den statischen abweichen. Die Schleifen sind in Fig. 28 wiedergegeben und die Inhalte verhalten sich ungefähr wie 1 : 1,2.

Bezüglich der Verteilung der Verluste auf die einzelnen Phasen (Fig. 14) ist zunächst zu bemerken, dass derselbe in der Phase II grösser als in I ist, die beiden aber symmetrisch verlaufen; es müssen also zufällige Verschiedenheiten im Aufbau daran schuld sein, da ein Energiefluss von einer Phase in die andere bei symmetrischem Aufbau des Transformators nicht möglich ist. Dagegen müssen für den gerade entgegengesetzten Verlauf bei der superponierten Phase andere Gründe

gesucht werden. Von den vier Maximis der doppelperiodigen Komponente der Kraftflusskurve liegt bei ∾ 10° eins beim höchsten über-

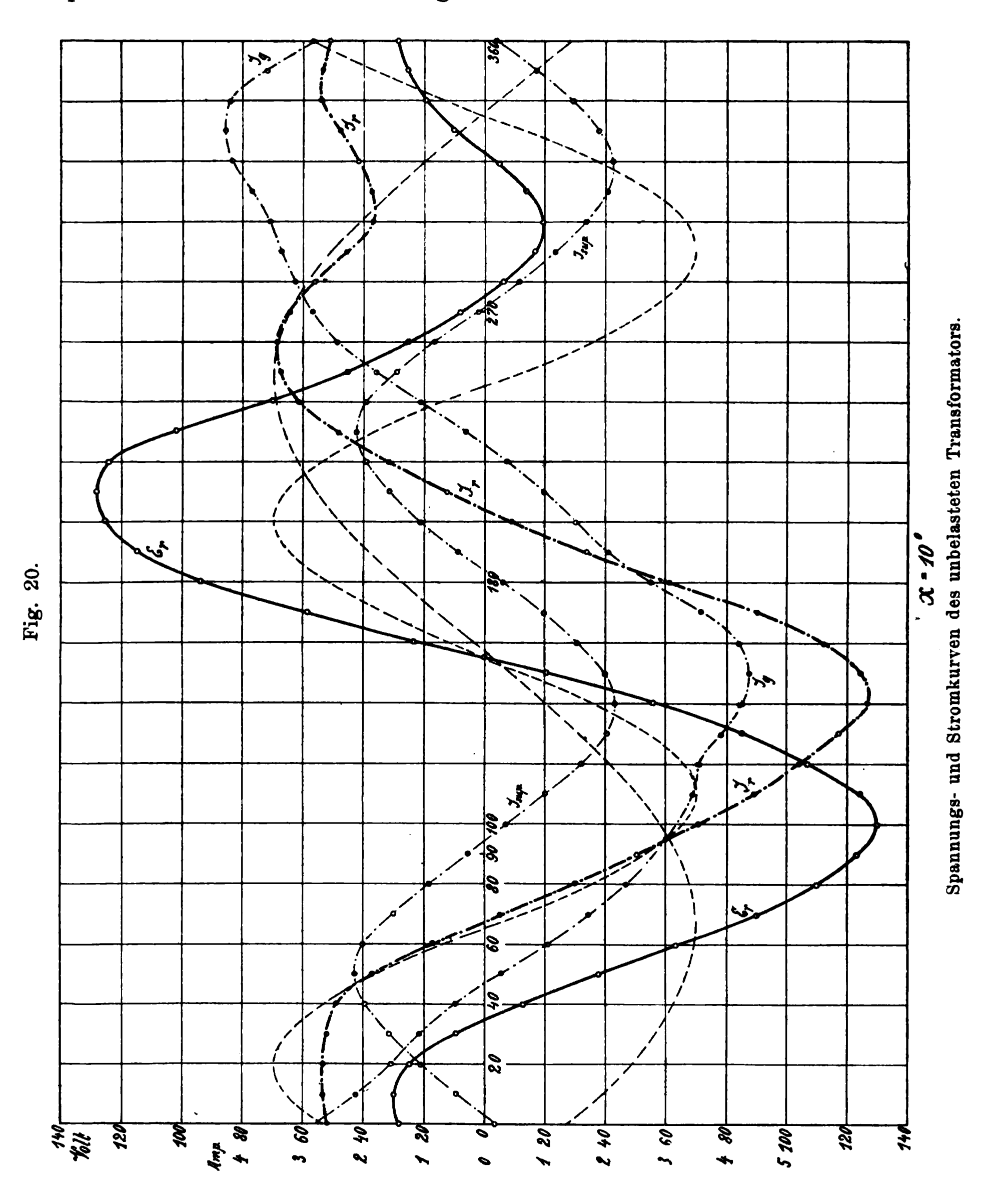


Fig. 20.

Spannungs- und Stromkurven des unbelasteten Transformators.

haupt vorkommenden Maximum, und zu den beiden anderen Maximis der resultierenden Kurve liefern jene auch einen erheblichen Beitrag. Bei ∾ 40° dagegen werden zwar die zwei Maxima der resultierenden

Kurve erheblich von der superponierten Kurve beeinflusst, dieselben sind aber geringer als dasjenige im vorigen Falle und vor allem findet

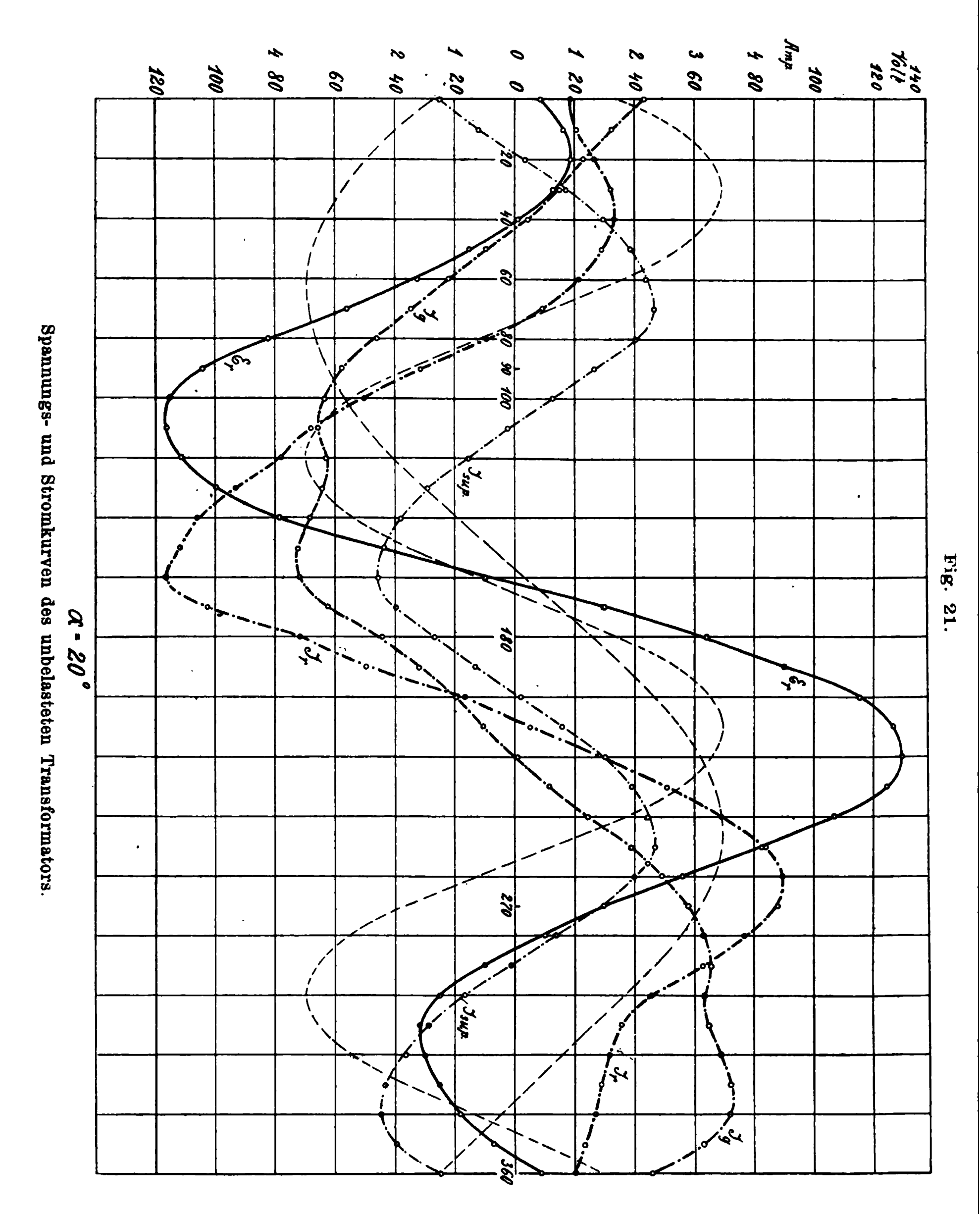


Fig. 21.

Spannungs- und Stromkurven des unbelasteten Transformators.

$\alpha = 20°$

ein Maximum der superponierten Kurve statt beim Durchgang der resultierenden Kurve durch 0. Vergleicht man ferner die Verluste mit

denjenigen bei getrenntem Betriebe, so sieht man, dass für das Grundsystem die Hysteresisverluste ungefähr dem Maximum, das bei poly-

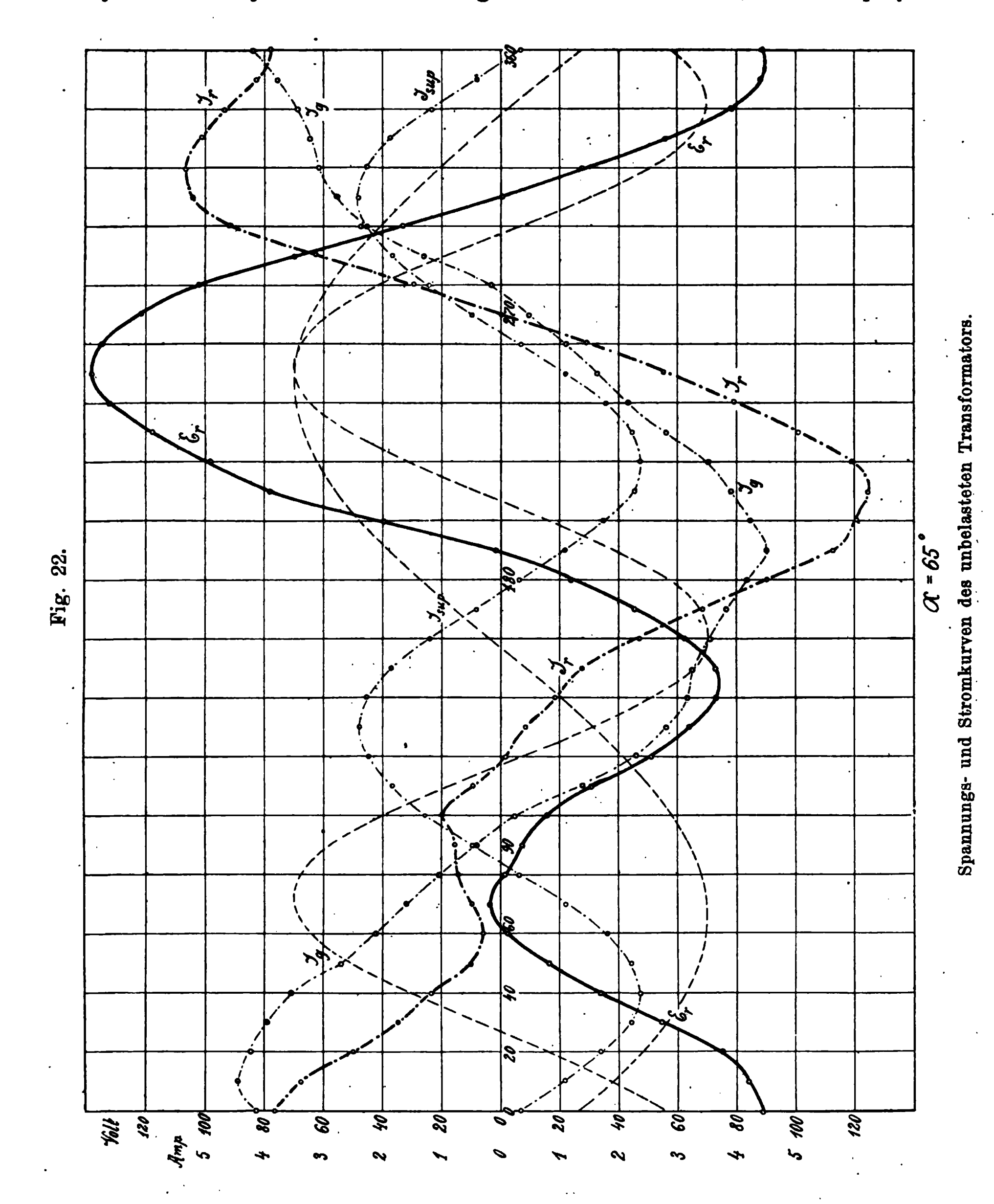


Fig. 22.

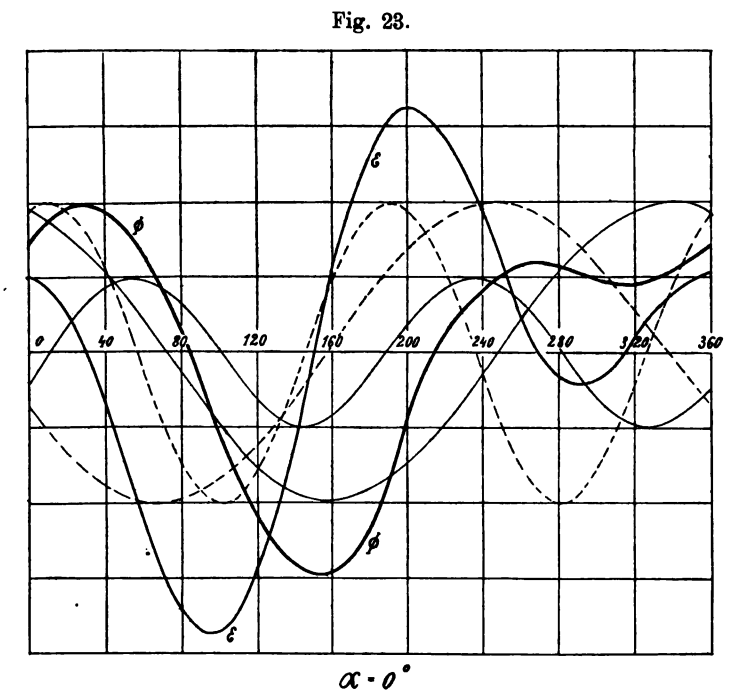
$\alpha = 65°$

Spannungs- und Stromkurven des unbelasteten Transformators.

cyklischem Betrieb auftritt, entsprechen. Für die superponierte Phase dagegen sind die Verluste polycyklisch stets bedeutend herabgemindert.

Da nun auch der Strom für das Grundsystem die charakteristischen Hysteresisverzerrungen (Fig. 20 bis 22) zeigt, derjenige für das superponierte dagegen kaum, da ferner, wie die anderen Spannungsverhältnisse zeigen, beim überwiegenden Wert des Grundsystems der Unterschied im superponierten noch grösser wird, so muss man sich den Vorgang so vorstellen, dass das Eisen gewissermassen einen Hauptummagnetisierungsprozess vom Grundsystem aus durchmacht, der vom superponierten System nur modifiziert wird; dass also das super-

Fig. 23.



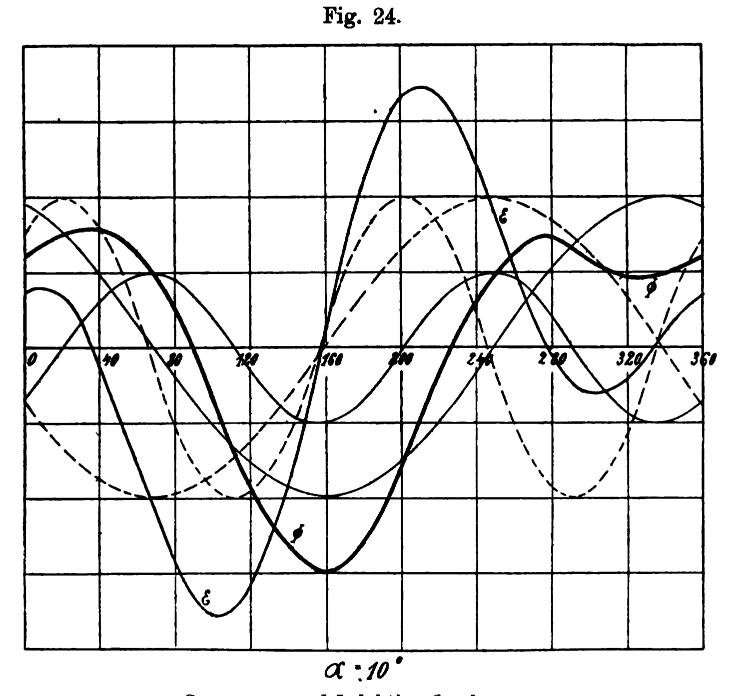
Spannungs- und Induktionsflusskurven.

ponierte System nur für die Veränderung der Fläche (Arbeit) der Grundhysteresisschleife zu sorgen hat und dass diese Veränderung, die einmal Vergrösserung, einmal Verkleinerung ist, geringer ist als die eigene Hysteresisschleife.

Bezüglich der Wirbelstromverluste hatten wir abgeleitet, dass dieselben nur vom Effektivwert abhängig seien, also von der gegenseitigen Lage der Kurven unabhängig; demgegenüber zeigt die Summe der Wirbelstromverluste (Fig. 17) ein ausgesprochenes Maximum bei ungefähr 20°, ein Minimum zwischen 30° und 40°. Es müssen also die Voraussetzungen, unter welchen wir gerechnet haben, nicht erfüllt

sein, was sich auch bei näherer Betrachtung ergibt. Zunächst sind die Stossfugen, wie bereits am Eingang der Untersuchungen erwähnt, nicht einwandsfrei isoliert, so dass dort parasitäre Foucaultströme entstehen, deren Bahnen ganz unbekannt sind und deren Schirmwirkung nicht mehr vernachlässigt werden kann; auch muss ein Teil des Flusses zum Uebergang aus den Säulen in die Schlussbleche einen Teil der letzteren senkrecht schneiden, wie aus der Zeichnung hervorgeht, was auch mit unseren Voraussetzungen im Widerspruch steht. Berechnen

Fig. 24.



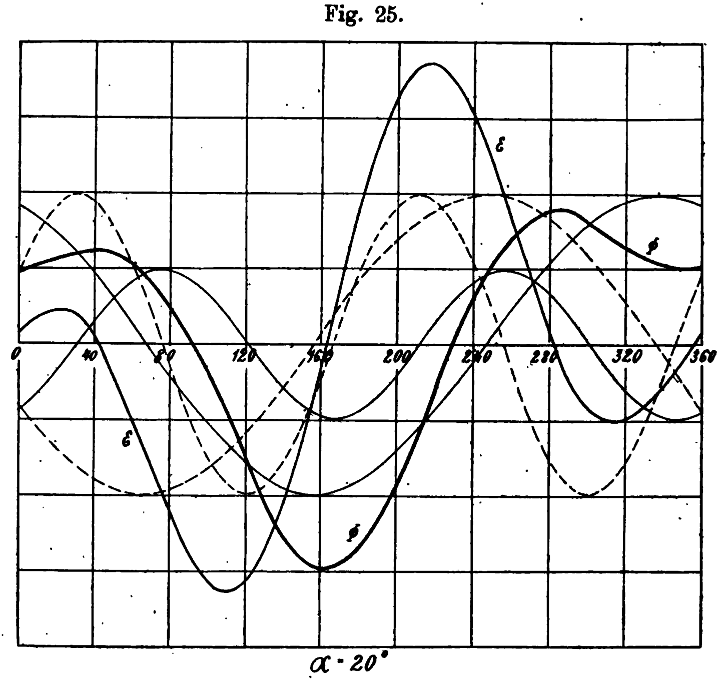
Spannungs- und Induktionsflusskurven.

wir die Verluste unter den früheren Voraussetzungen und unter vereinfachenden Annahmen für den Verlauf des Induktionsflusses in den Kopfblechen, so finden sich 107 Watt, also erheblich weniger als experimentell gefunden.

Die Verhältnisse, unter welchen ein Teil der Wirbelströme hier entstehen, sind sehr kompliziert und der Rechnung nicht zugänglich; auch die vorhandene Litteratur über Wechselstrommagnetisierung gibt hierüber keinen Anhalt, da entweder die Wirbelströme bei den Untersuchungen durch die Versuchsanordnung vernachlässigt werden konnten (z. B. bei M. Wien), oder die Rechnungen sich nur auf das magne-

tische Moment unter Berücksichtigung der Wirbelströme beziehen und vor allem nur für ganz einfache Fälle (Stab, Blech und für konstante Permeabilität) durchgeführt sind. Dass die parasitären Wirbelströme die Veränderlichkeit der Verluste bedingen, konnte experimentell an einem Eisenuntersuchungsapparat festgestellt werden, bei welchem die Entfernung der Stossfugenisolation dieselbe ganz bedeutend erhöhte. Erscheint eine exakte Darstellung unmöglich, so kann man doch zu einer einigermassen befriedigenden Vorstellung gelangen, wenn man

Fig. 25.

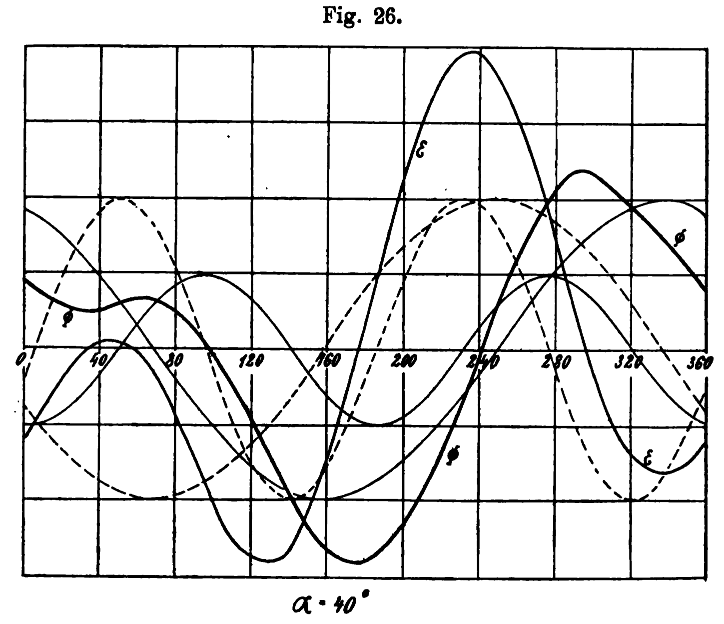


Spannungs- und Induktionsflusskurven.

die Form der Kraftflusskurve beim Maximum der Verluste betrachtet (Fig. 25), welche hier durchschnittlich am wenigsten steil verläuft (d. h. die Maxima der induzierten E.M.K. sind am geringsten). Die Wirbelströme werden hier also die thatsächliche Erreichung des Maximalwertes der Induktion weniger verhindern als dort, wo die Maxima der Kraftflusskurve unter rascherem Ansteigen erreicht werden; die Schirmwirkung also, welche, ceteris paribus, die Verluste vermindert, wird gerade dort am schwächsten sein, wo auch das Maximum der Verluste wirklich auftritt. Dass das Minimum schon zwischen 30° und 40° auftritt, ist verwunderlich; jedoch steigen die Verluste weiter

langsam an und ein Beobachtungsfehler von 1 bis 2 % ist durchaus nicht ausgeschlossen, wie eine Wiederholung der Versuche zeigte; auch lagen die Punkte bei der graphischen Trennung der Verluste in Hysteresis- und Wirbelstromverluste nicht ganz genau in einer Geraden; in Anbetracht der parasitären Foucaultströme ist das Gesetz, dass die Verluste dem Quadrat der Periodenzahl proportional sind, jedenfalls nicht streng richtig. Berücksichtigt man diesen Umstand, so wird man für die Verteilung der Wirbelstromverluste auf die einzelnen Systeme keine Erklärung suchen, da dieselbe keine recht charakte-

Fig. 26.



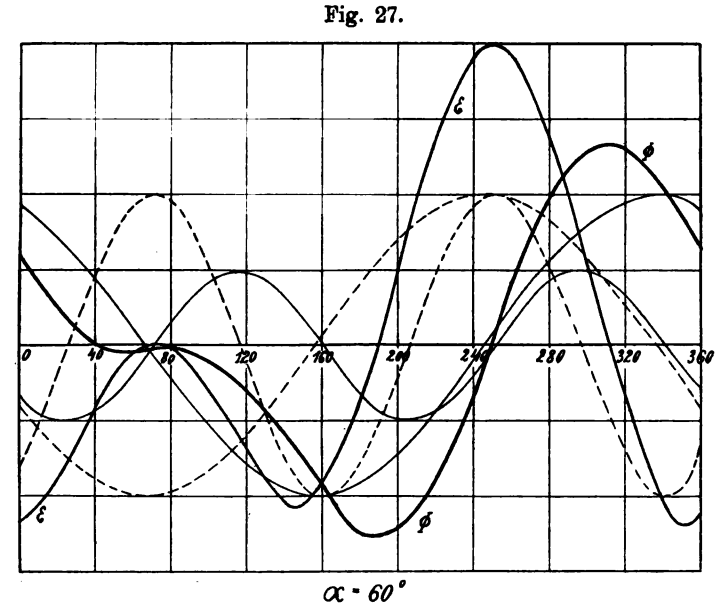
Spannungs- und Induktionsflusskurven.

ristische Eigenheit zeigt; auch unterscheiden sich die Verluste fast gar nicht von denjenigen bei getrenntem Betriebe.

Bei den beiden anderen Spannungsverhältnissen wurden keine Kurven aufgenommen, bei $E_I = E_{II} = 111$ Volt, weil die Erregerwickelung der Generatoren (deren normale Spannung bei dieser Periodenzahl etwa 74 Volt beträgt) nicht während der ganzen Dauer einer Kurvenaufnahme eingeschaltet bleiben konnte, während bei $E_I = E_{II} = 84$ der den Kontaktgeber treibende Motor nicht auf Synchronismus gebracht werden konnte. Da die Spannungskurven in ihrem Charakter den aufgenommenen stets ähnlich sind und aus den Stromkurven nicht viel zu ersehen ist, ist dieses auch ohne Belang. Die Betrachtung der

Verluste zeigt ein ähnliches Verhalten wie beim ersten Falle, nur sind die Abweichungen beim Wert $E_I = E_{II} = 111$ Volt (Fig. 15 und 18) noch stärker ausgeprägt, beim anderen (Fig. 16 und 19) dagegen weniger. Das gilt besonders für die Hysteresisverluste, die bei $E_I = E_{II} = 111$ Volt für das Grundsystem polycyklisch sogar etwas grösser als getrennt werden können, während die Verminderung für das superponierte System auf weniger als die Hälfte geht. Umgekehrt ist bei $E_I = 115$ Volt nach unserer Anschauung schon der doppelperiodige Ummagnetisierungsprozess der vorherrschende, denn der Verlust in diesem

Fig. 27.



Spannungs- und Induktionsflusskurven.

System ist fast ebenso gross wie bei getrenntem Betriebe, während für das Grundsystem schon eine erhebliche Verminderung eintritt.

Fasst man nun das praktische Ergebnis dieser Untersuchungen zusammen, so ergibt sich folgendes: Vergleichen wir den polycyklischen Transformator von 10 K.W. bezüglich der Eisenverluste mit zwei von 5 K.W., der eine für 62, der andere 31 Perioden, so ergibt sich bei vorteilhaftester Lage der Spannungskurven zu einander eine Ersparnis von etwa 14 % und zwar bei allen Spannungen ziemlich unverändert. Absolut werden die Verluste desto kleiner, je grösser die superponierte Spannung relativ zur anderen ist, weil der Transformator sich mehr einem solchen von hoher Wechselzahl nähert. Der

geringste Verlust tritt auf für die symmetrische Kurvenform, d. h. keine Phasenverschiebung zwischen beiden Systemen. Bei der ungünstigsten Kurvenform steigt der Verlust dagegen um 5 % bis 7 %, je nachdem das superponierte oder das Grundsystem überwiegt. Da das Maximum der Wirbelströme in nächster Nähe des Minimums der Gesamtverluste liegt, und jenes auf die parasitären Wirbelstromverluste zurückzuführen ist, so lässt sich das Minimum der Gesamtverluste durch sorgfältigere Ausführung der Stossfugen noch heruntersetzen, so dass die Kurvenform für den Jahreswirkungsgrad jedenfalls in Betracht kommt. Als günstig zu verzeichnen ist es, dass die vorteilhafteste Kurven-

Fig. 28.

Statische Hysteresisschleifen bei verschiedener Ummagnetisierung.

form auch das geringste Spannungsmaximum für den gegebenen Effektivwert hat, also wahrscheinlich auch für die Isolation am günstigsten ist.

Bei Verwendung der dritten Harmonischen ergibt sich zunächst, dass die gegenseitige Lage der beiden Generatoren höchstens etwa 1 ½ % Abweichungen in die Verluste hineinbrachte; dagegen ist auch hier die Ersparnis gegen den getrennten Betrieb wesentlich, wie folgende Zahlen ergeben:

$E_{I} = E_{II} = E_1 = 100$ Volt.

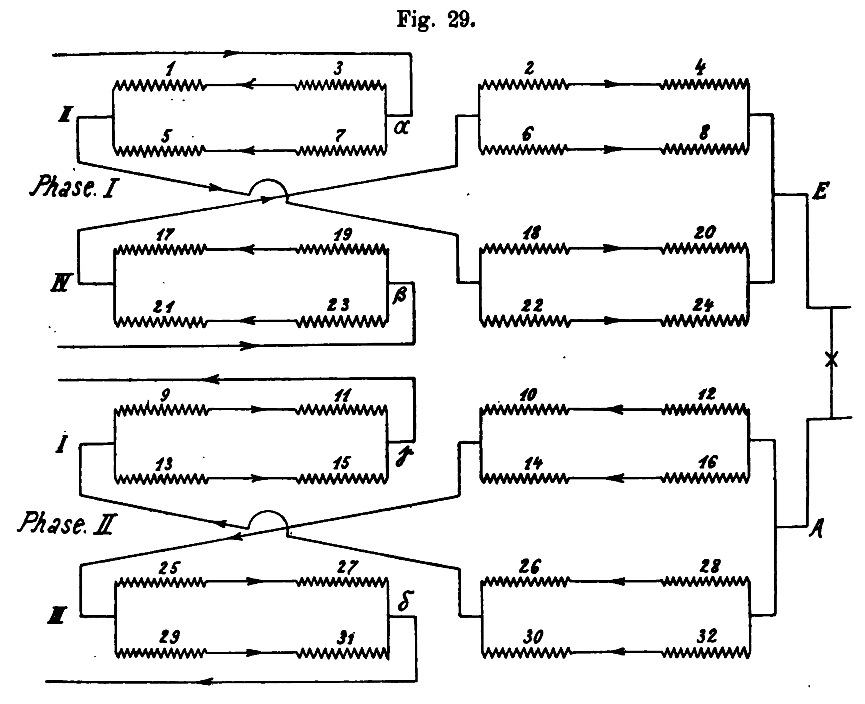
	H_{I}	W_{I}	H_{II}	W_{II}	H_1	W_1
Zweiphasig	63,0	45,0	68,0	42,9	—	—
Einphasig	—	—	—	—	75,1	53,5
Polycyklisch	60,7	43,0	63,5	39,9	55,0	49,0

Das Verhalten ist also ganz ähnlich dem bei der zweifachen Harmonischen, auch die Grössenordnung der Ersparnis die gleiche.

Drosselspule mit Bifilarwickelung.

Dieser Apparat nach D.R.P. Nr. 131150 wurde aus dem vorher beschriebenen polycyklischen Transformator durch einfache Umschaltung hergestellt nach dem Schaltungsschema Fig. 29.

Fig. 29.



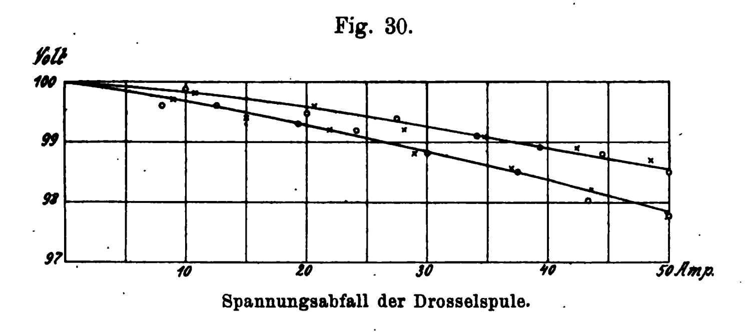
Schaltungsschema der Drosselspule.

Die an die Spulen geschriebenen Zahlen geben die Lage derselben auf den Säulen an; verfolgt man den Stromlauf des superponierten Stromes, wie ihn die Pfeile andeuten, so sieht man, dass die Spulen auf einer gleichen Säule abwechselnd in entgegengesetztem Sinne durchflossen werden. Eine Magnetisierung der Säule kann nicht eintreten und die Kraftlinien können sich nur als sogenannte Streulinien durch die Luft schliessen; die Selbstinduktion wird also nicht ganz aufgehoben werden, wie bei einer reinen Bifilarwickelung, sondern im geringeren Masse bestehen bleiben. Da eine

derartige Ausführung in getrennten Spulen bei Hochspannung unumgänglich ist, musste erstens untersucht werden, ob die Induktanz praktisch vernachlässigbar ist; zweitens, ob auch hier wirkliche Unabhängigkeit zwischen beiden Systemen besteht. Es sei gleich bemerkt, dass die Verhältnisse für geringe Induktanz hier relativ günstig liegen, da die Spulen, welche, wie erwähnt, die Primärwickelung des früheren Transformators bildeten, vom Eisen infolge des Vorhandenseins der Sekundärwickelung relativ weit entfernt sind.

Zunächst wurde der durch die veränderten Verbindungen etwas geänderte Ohmsche Widerstand nachgemessen aus Strom und Spannung; derselbe betrug von α bis E 0,0304 Ω, von β bis E 0,0300, der Kombinationswiderstand dieser Hälfte, nach der Formel $\frac{w_1 w_2}{w_1 + w_2}$, 0,0151 Ω. Die entsprechenden Werte für die andere Hälfte sind: δ bis A = 0,0293,

Fig. 30.



Spannungsabfall der Drosselspule.

γ bis A = 0,0301 Ω, der Kombinationswiderstand also 0,0149. Der gesamte Widerstand der Drosselspule für den superponierten Strom beträgt also 0,03 Ω.

Die Messmethode war derjenigen der vorher beschriebenen Versuche entsprechend. Es wurde erst der Spannungsabfall in der Drosselspule bei ruhendem Zweiphasensystem, dann polycyklisch untersucht. Dabei wurde die superponierte Spannung vor der Drosselspule, woselbst sie als verkettete auftritt, mit Hilfe eines neutralen Punktes gemessen; wie früher wurden vor Beginn des Versuches die Leitungswiderstände in den beiden Zuleitungen jeder Phase gleich gemacht, was hier sehr leicht zu erreichen war, da der grösste Teil der Impedanz in den, wie erwähnt, nicht bifilaren Generatoren lag; die bei induktionsfreier Belastung des Einphasenkreises gefundenen Resultate waren nun folgende (Fig. 30):

1. Unabhängig.

E_1	E_2	J	c
100,1	98,5	50,0	66
100,1	98,8	44,6	66
100,1	98,9	39,5	66
100,1	99,1	34,2	66
100,1	99,4	27,5	66
100,1	99,5	20,1	66
100,1	99,9	10,3	66

Derselbe Versuch wurde nun polycyklisch durchgeführt, indem die Zweiphasenmaschine auf 100 Volt bei 33 Perioden erregt wurde. Die Werte, in der Kurve durch Kreuze im Gegensatz zu den Kreisen des vorigen Versuches bezeichnet, sind folgende:

2. Polycyklisch.

E_1	E_2	J	c
100	98,7	48,4	66
100	99,0	42,5	66
100	99,1	35,0	66
100	99,2	28,1	66
100	96,6	21,0	66
100	99,8	10,9	66

Die Abweichungen von der Kurve liegen vollständig im Bereiche der Beobachtungsfehler, wenn man die der Methode anhaftende grosse Ungenauigkeit berücksichtigt, und diese Ergebnisse konnten nur bei äusserster Sorgfalt in dieser Genauigkeit erzielt werden. Es wurde daher eine direkte Bestimmung des Abfalles versucht, die aber nur bei Volllast und induktiver Belastung einen zur Kontrolle brauchbaren Wert liefern konnte und auch die Resultate im möglichen Masse bestätigte. Da eine direkte Messung des Abfalles zwischen den Punkten α, β einerseits, E andererseits (Fig. 29) unmöglich war, wegen der zwischen diesen Punkten bestehenden Spannung von $\backsim$ 33, wurde zwischen α und β wiederum ein neutraler Punkt geschaffen durch einen induktionsfreien Widerstand von 40 Ohm, und an diesen Punkt und E das Westonvoltmeter von 7 Volt angeschlossen. Vor dasselbe war demnach ein Widerstand von $\frac{40}{4} = 10$ Ohm vorgeschaltet und die Ab-

lesungen bei einem inneren Widerstand von 87,7 Ohm mit $\frac{97,7}{87,7}$ $= 1,113$ zu multiplizieren. Der offenkundige Nachteil dieser einzig möglichen direkten Messung der Differenz liegt weniger in der Verkleinerung des Ausschlages um etwa 10 % (die sich ja weiter vermindern liesse), als in der Thatsache, dass man nur die Hälfte des Abfalles misst. Da nun das betreffende Voltmeter, das empfindlichste, welches zur Verfügung stand, gerade bei 1 Volt erst eine halbwegs brauchbare Skala zeigt, war auch dies Verfahren unanwendbar.

Um über den wesentlichsten Punkt, die Unabhängigkeit, trotzdem ganz sicheren Aufschluss zu haben, wurde bei voller Einphasenbelastung die Zweiphasenmaschine von einer fremden Stromquelle aus auf volle Tourenzahl gebracht (sie lief bei allen Versuchen langsam mit, um die Impedanz derselben für den superponierten Strom von der Lage der Armatur unabhängig zu machen) und allmählich voll erregt: es konnte aber keinerlei Abweichung bei zunehmender Zweiphasenspannung konstatiert werden, wodurch die völlige Unabhängigkeit als erwiesen betrachtet werden kann.

Auf die zweite Frage, inwiefern die Wickelung als wirklich induktionsfrei gelten kann, geben diese Versuche noch keine Antwort. Denn wenn auch die Kurve für 50 Amp. genau 1,5 Volt Abfall gibt, entsprechend dem Ohmschen Widerstande, so sind doch Abweichungen von 0,2 Volt unsicher. Da nun ausserdem die Wirkung der Selbstinduktion bei induktionsfreier Belastung eine relativ geringe ist, da der von ihr bewirkte Spannungsabfall senkrecht zum Spannungsvektor steht, wurde eine zweite Versuchsreihe gemacht bei $\cos \varphi = 0,7$. Hätte man es mit reinem Ohmschen Widerstande zu thun, so müsste die gemessene (arithmetische) Spannungsdifferenz kleiner werden; wird sie grösser, so ist das Vorhandensein von Selbstinduktion erwiesen. Der $\cos \varphi$ wurde kleiner gewählt als er in einem Lichtnetze je vorkommen wird; der so auftretende Spannungsabfall wird also als äusserste, gewöhnlich nicht erreichte Grenze zu betrachten sein. Die gefundenen Werte sind, entsprechend dem vorigen Versuch:

1. Unabhängig.

E_1	E_2	J	$\cos \varphi$	c
100,0	97,8	50,1	0,706	66
100,0	98,0	43,2	0,704	66
100,0	98,5	37,6	0,704	66

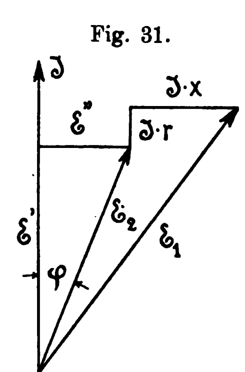
E_1	E_2	J	cos φ	c
100,0	98,8	30,0	0,704	66
100,0	99,2	23,4	0,706	66
100,0	99,3	19,4	0,702	66
100,0	99,6	12,5	0,701	66
100,0	99,6	8,0	0,703	66

2. Polycyklisch.

E_1	E_2	J	cos φ	c
100,0	97,8	50,0	0,704	66
100,0	98,2	43,6	0,706	66
100,0	98,6	37,0	0,704	66
100,0	98,8	29,0	0,705	66
100,0	99,2	21,9	0,705	66
100,0	99,4	15,1	0,702	66
100,0	99,7	9,0	0,702	66

Die geringen Abweichungen zwischen den beiden Versuchsreihen bestätigen die vorher gefundene Unabhängigkeit. Ferner zeigt der vergrösserte Spannungsabfall, dass Selbstinduktion in geringem Masse doch noch vorhanden ist; jedoch liegt der Spannungsabfall unterhalb der Grenzen, die für Transformatoren in diesen Grössenverhältnissen zugelassen zu werden pflegen. In einem Falle, in welchem die Ströme ohne Spannungsänderung getrennt werden sollen, also ohne weitere Transformation, kann man den ganzen Spannungsverlust in denjenigen Grenzen halten, welche Glühlampenbelastung zieht.

Fig. 31.



Will man über die Grössenordnung der Induktanz einer solchen Wickelung einen Anhalt gewinnen, so kann man diese mit derselben Annäherung, welche den Versuchen zukommt, aus dem Spannungsabfall berechnen. Dabei wird man nicht die abgelesenen Werte direkt, sondern die aus der Kurve interpolierten Werte verwenden (da die Werte bei induktiver Belastung wegen ihrer Grösse genauer sind und die Reaktanz bei ihnen mehr zur Geltung kommt, wird man sie aus diesen berechnen).

Benützt man hierbei Fig. 31, so findet man, wenn r der Widerstand, x die Reaktanz der Drosselspule ist, und $E'' = E_2 \sin\varphi$, $E' = E_2 \cos\varphi$ die Komponenten der Spannung E_2 darstellen,

$$E_1 = \sqrt{(E' + Jr)^2 + (E'' + Jx)^2}.$$

Daraus findet sich

$$x = -\frac{E''}{J} \pm \frac{1}{J}\sqrt{E_1^2 - (E' + Jr)^2}.$$

Berechnet man x nach dieser Formel, so ergibt sich ein Mittelwert von 0,024 Ω, was bei 66 ∾ einer Induktanz von $5{,}9 \cdot 10^{-5}$ Henry entspricht.

Dieser Apparat gestattet ferner noch die Trennung des superponierten Stromes mit gleichzeitiger Abgabe des Grundstromes unter Transformierung desselben. Auch dieses wurde untersucht und es konnte bei Variationen in dem einen Systeme keine Einwirkung auf das andere festgestellt werden, wie folgende, bei induktionsfreier Belastung aufgenommene Tabellen zeigen:

I.

E_1	E_2	J_1	E_{I_1}	E_{I_2}	J_I	E_{II_1}	E_{II_2}	J_{II}	c
100,0	98,5	49,6	100,0	96,0	24,6	100,0	95,8	24,2	33
100,0	98,5	49,5	100,0	96,0	21,6	100,0	96,0	21,2	33
100,0	98,4	49,5	100,0	96,3	18,8	100,0	96,6	17,4	33
100,0	98,4	49,6	100,0	97,0	14,8	100,0	96,9	14,1	33
100,0	98,6	49,7	100,0	97,2	11,6	100,0	97,1	10,9	33
100,0	98,3	49,6	100,0	97,4	8,6	100,0	97,6	7,6	33
100,0	98,3	49,6	100,0	98,3	0	100,0	98,2	0	33

II.

E_1	E_2	J_1	E_{I_1}	E_{I_2}	J_I	E_{II_1}	E_{II_2}	J_{II}	c
100,0	98,2	49,8	100,0	95,8	24,4	100,0	95,6	24,5	33
100,0	98,4	39,2	100,0	95,7	24,4	100,0	95,7	24,6	33
100,0	99,1	33,2	100,0	95,7	24,5	100,0	95,7	24,6	33
100,0	99,3	26,1	100,0	95,8	24,5	100,0	95,7	24,6	33
100,0	99,6	15,2	100,0	95,8	24,4	100,0	95,8	24,5	33
100,0	100,0	0	100,0	95,7	24,5	100,0	95,7	24,5	33

Der polycyklische Motor.

Diese Untersuchung wurde nach dem gleichen Prinzip wie die vorige durchgeführt, indem erst der Motor als gewöhnlicher Zweiphasenmotor, dann als Drosselspule, dann polycyklisch geprüft wurde.

Der Motor unterscheidet sich von einem gewöhnlichen Zweiphasenmotor nur durch seine bifilare Wickelung nach D.R.P. Nr. 131550. welche so ausgeführt ist, dass stets zwei Drähte, welche vom Hauptstrome im gleichen Sinne, vom superponierten Strom im entgegengesetzten Sinne durchlaufen werden, in eine Nut zu liegen kommen. Der Motor ist vierpolig für eine Spannung von 100 Volt ausgeführt. Die wichtigsten Dimensionen sind nachstehend angegeben:

Eisenbohrung	220;	äusserer Eisendurchmesser	384 mm
Anker . . .	219;	innerer „	75 „
Eisenlänge .	95;		

daraus der Eisenquerschnitt des Stators 70 qcm. Die Windungszahl pro Phase beträgt 288, 12 pro Nut. Die Nutenzahl ist demnach primär 48. Der Wickelungsfaktor ist für den vorliegenden Fall 0,901, die Induktion $B = 3760$ Gauss.

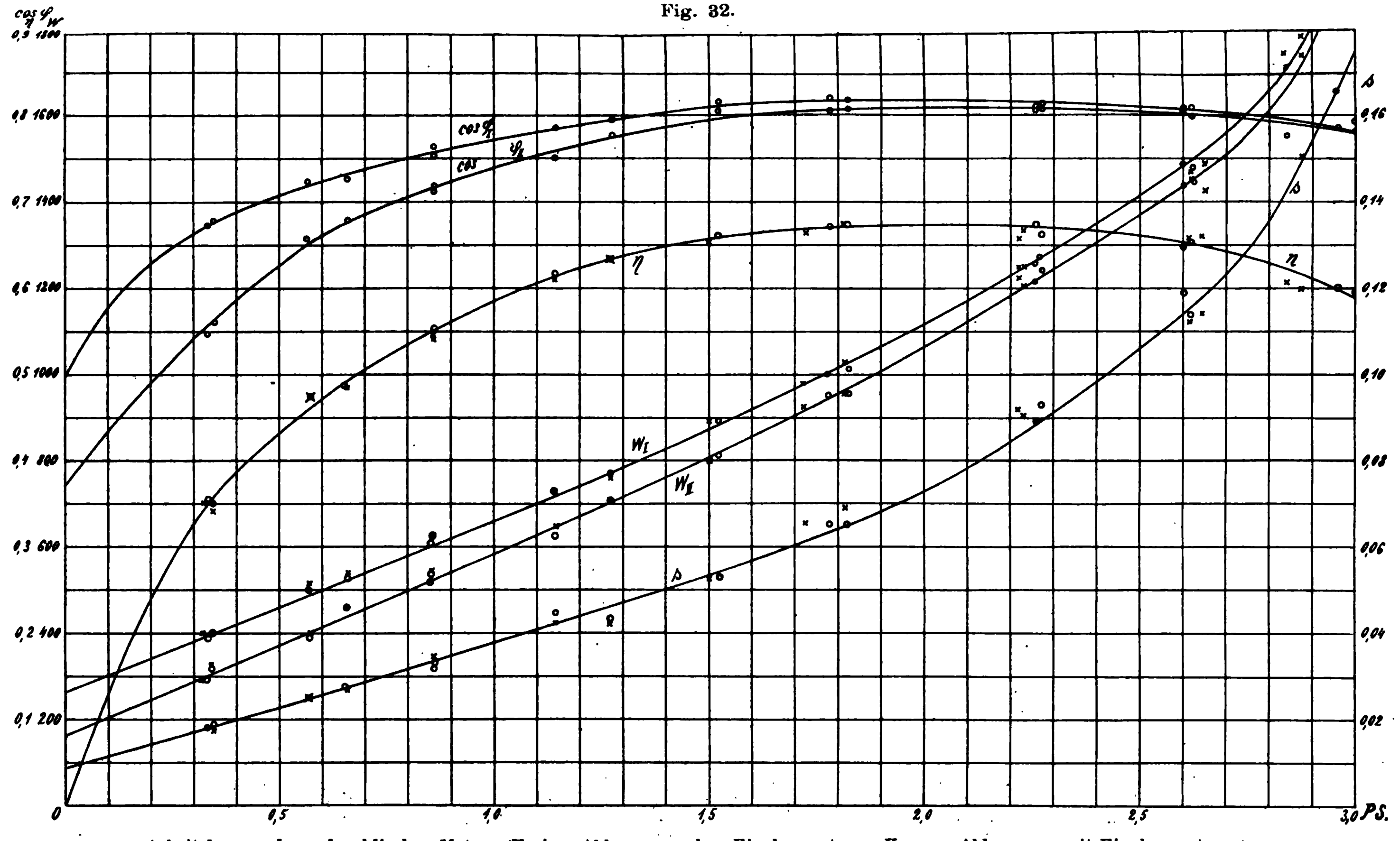
Im Rotor beträgt die Windungszahl pro Phase 270, während die Nutenzahl 60 beträgt. Daraus ergibt sich eine gewisse Unsymmetrie in der Wickelung, da eine Spule in 14 Nuten, die andere in 16 Nuten untergebracht ist (dies rührt daher, dass der Motor eigentlich eine Drehstromtype ist, hat aber im Rotor keine grosse Bedeutung). Der Wickelungsfaktor ist im Mittel 0,895. Die Phasen sind unverkettet im Rotor und werden zu vier Schleifringen geführt. Die auf diesen ursprünglich vorhandenen Kohlenbürsten wurden durch Kupferbürsten ersetzt, um den ohnehin grossen Rotorwiderstand etwas herabzumindern. Der Drahtquerschnitt ist im Rotor 2,27 qmm und es liegen zwei parallel; im Stator dagegen ist der Querschnitt 6,18 qmm.

Es wurde zunächst das Motordiagramm aufgenommen zur späteren Kontrolle der direkt gefundenen Werte; es ist hier jedoch nicht wiedergegeben, da es für die Unabhängigkeitsversuche wenig aussagt, obwohl bei den Aufnahmen keine Veränderung durch das Einschalten des superponierten Stromes zu bemerken war; eine genaue Untersuchung der Unabhängigkeit erfordert jedoch auch eine direkte Aufnahme aller in Frage kommenden Grössen: Leistung, Schlüpfung, Wirkungsgrad und Phasenverschiebung mit und ohne Vorhandensein superponierten Stromes, und umgekehrt Spannungsabfall in der Drosselspule bei ruhendem und bei

belastetem Motor. Die Versuche waren sehr schwierig genau auszuführen, waren doch bei polycyklischem Betrieb bis zu 15 Ablesungen — inkl. Tourenzahlen — möglichst gleichzeitig zu machen. Aus diesem Grunde wurden die mit einem Gleichstromgenerator als Belastung vorgenommenen Bremsversuche — besonders bei kleineren Werten — nicht genau genug, um daraus Schlussfolgerungen über eventuelle geringe Einwirkungen der beiden Systeme aufeinander zu ziehen. Etwas bessere Werte ergab die Verwendung einer Wirbelstrombremse, welche bis zu 3 PS. abzubremsen gestattete; die mit derselben erhaltenen Werte sind im folgenden wiedergegeben und besprochen.

Das Schaltungsschema bei diesen Messungen entsprach genau demjenigen beim Transformator in Fig. 4. Es mussten stets die Strom- u. s. w.-Werte in beiden Phasen primär abgelesen werden, da letztere als gekreuzte Spulen verschieden gewickelt, auch verschiedene Längen und Widerstände hatten. Die Schlüpfung wurde in bekannter Weise mit einem Telephon gemessen, das mit einer vom Rotorstrom beeinflussten Induktionsspule in Reihe geschaltet war. Diese Messung war aber nur bis zu 6 % (bei 33 ∾) brauchbar; darüber hinaus musste auf Tourenablesung zurückgegriffen werden, was bei grösseren Werten ja auch weniger ungenau ist. Eine stroboskopische Messung musste an der Unmöglichkeit, eine Bogenlampe mit 33 ∾ zu betreiben, scheitern; der Versuch, die Bogenlampe mit der doppelten Periodenzahl durch einen gekuppelten Generator zu speisen, erwies sich als zwecklos; das Kreuz auf der Scheibe musste natürlich verdoppelt erscheinen, es war aber so verschwommen, dass beim geringen Abstande der einzelnen Streifen nur bei Leerlauf eine sichere Messung möglich war. Die Temperatur wurde möglichst konstant gehalten und schwankte zwischen 39° und 43°, an der Statorwickelung gemessen. (Das Anwärmen geschah immer durch Bremsen, nicht durch Einphasenstrom, so dass auch bei polycyklischem Betrieb bei gleichen Statortemperaturen der Rotor nicht wesentlich kälter als bei unabhängigem war.) Die Statorspannungen pro Phase weichen um höchstens 0,3 Volt vom Sollwert 100 Volt ab; eine genauere Regulierung war nicht möglich und die Werte können hier nicht, wie bei einer einfachen Spannungsabfallkurve, reduziert werden. Es wurden noch die Ströme im Rotor gemessen, da eine etwaige Induktion des superponierten Stromes auf den Rotor am leichtesten an diesen zu konstatieren wäre; sie wurden an Hitzdrahtampèremetern abgelesen. Die gemessenen Werte sind: Spannung, Strom und Leistung pro Phase (E_I, J_I, W_I, E_{II}, J_{II}, W_{II}), Periodenzahlen beider Systeme c_I und c_1, Ströme in den beiden Rotor-

Fig. 32.



Arbeitskurven des polycyklischen Motors (Kreise: Ablesungen ohne Einphasenstrom; Kreuze: Ablesungen mit Einphasenstrom.)

phasen (J_{R_I} und $J_{R_{II}}$), Schlüpfung (s). Aus Motortourenzahl, Hebelarm und Gewicht an der Bremse ist die abgegebene Leistung (PS) und aus dieser der Wirkungsgrad (η) berechnet. Für das superponierte System wurde zunächst noch Strom und Spannungen (J_1, E_1, E_2) gemessen.

1. Versuch: Einphasig unerregt (Fig. 32).

E_I	J_I	W_I	$\cos \varphi_I$	E_{II}	J_{II}	W_{II}	$\cos \varphi_{II}$	c_I	s (%)	PS	η	J_{R_I}	$J_{R_{II}}$
99,7	23,5	1835	0,785	100,0	23,0	1800	0,784	33,1	16,6	2,96	0,60	25,0	27,0
100,3	18,4	1495	0,808	100,2	18,2	1460	0,804	33,0	11,9	2,60	0,648	18,5	20,5
99,9	15,3	1240	0,811	100,1	15,0	1215	0,809	32,9	8,9	2,26	0,678	15,8	17,0
99,9	12,3	1005	0,817	99,7	11,9	960	0,806	32,9	6,5	1,82	0,677	13,2	13,4
100,1	10,9	890	0,816	99,9	10,0	805	0,805	33,0	5,29	1,52	0,660	10,5	11,0
99,9	9,3	730	0,786	100,0	8,4	630	0,750	33,0	4,49	1,14	0,617	8,0	8,3
100,0	8,1	620	0,766	100,3	7,3	520	0,712	32,9	3,34	0,86	0,554	—	—
100,3	6,8	500	0,733	100,0	6,0	395	0,658	32,9	2,50	0,575	0,474	—	—
100,3	5,8	385	0,664	100,2	5,3	290	0,548	33,0	1,82	0,336	0,356	—	—
100,0	4,6	240	0,522	100,1	4,1	160	0,388	32,9	1,0	0	—	—	—

2. Bei polycyklischem Betrieb stellen J_I und J_{II} kombinierte Ströme dar, daher ist $\cos \varphi$ nicht mehr genau berechenbar.

E_I	J_I	W_I	E_{II}	J_{II}	W_{II}	c_I	s (%)	PS	η	E_1	E_2	J_1	J_{R_I}	$J_{R_{II}}$
99,8	23,7	1740	99,8	23,5	1720	32,9	15,7	2,84	0,604	100,1	97,5	14,9	—	—
100,2	19,8	1495	100,3	19,4	1425	33,0	11,4	2,64	0,665	99,9	97,4	14,9	18,8	20,5
100,2	16,8	1250	100,2	16,6	1205	33,1	9,01	2,23	0,669	100,1	97,3	14,9	15,3	16,8
100,0	14,8	1030	99,8	13,9	950	33,2	6,92	1,81	0,671	100,0	97,3	14,9	12,2	13,2
100,2	13,1	895	100,2	12,5	800	33,1	5,17	1,50	0,652	100,0	97,4	14,9	10,1	10,1
100,2	11,9	730	100,2	11,3	645	32,9	4,24	1,14	0,611	99,9	97,6	14,9	8,0	8,3
100,2	11,1	625	99,9	10,4	535	33,1	3,49	0,86	0,545	100,1	97,4	14,9	6,5	6,5
99,9	10,2	510	100,1	9,6	400	32,9	2,57	0,578	0,477	100,0	97,3	14,9	—	—
100,1	9,6	400	99,9	9,0	290	33,0	1,81	0,330	0,352	100,0	97,6	14,9	—	—
99,9	9,0	278	100,0	8,7	180	33,1	1,06	—	—	100,0	97,6	14,9	—	—

Der Wattverbrauch bei Leerlauf ist beim letzten Versuch etwas grösser als beim ersten; dies liegt daran, dass die Kupferscheibe der Bremse nicht entfernt war, wie beim ersten Versuch, weil dies zu umständlich und dem Apparat kaum zuträglich war; die vergrösserte Luftreibung und das remanente Feld erklären den Unterschied. Diese beiden Versuchsreihen zeigen geringe Abweichungen voneinander: so

sind z. B. die Werte des Wirkungsgrades bei polycyklischem Betrieb bei kleinen Leistungen alle etwas kleiner, bei grösseren etwas grösser als unabhängig.

Um dies näher zu prüfen, speziell die Grösse der Beobachtungsfehler festzustellen, wurde eine zweite Versuchsreihe gemacht, welche allerdings ergab, dass jene scheinbare Gesetzmässigkeit eine zufällige war. Die Aufnahme wurde diesmal so ausgeführt, dass bei möglichst unveränderter Belastung jede Ablesung einmal ohne, einmal mit superponiertem Strom gemacht wurde. Da ausserdem der Spannungsabfall ($E_1 - E_2$) mit abnehmender Belastung eine abnehmende Tendenz zu haben schien, wurde eine direkte Messung des vektoriellen Spannungsabfalles mit Hilfe eines neutralen Punktes vorgenommen. Dabei war es aber nur möglich, den Abfall in einer Hälfte der Wickelung zu messen, wodurch wieder die Genauigkeit bei kleineren Strömen wegen der Gestalt der Voltmeterskala gering wurde; die Widerstände für den neutralen Punkt waren so bemessen, dass die Ablesung nur mit 1,09 multipliziert zu werden brauchte. Der bifilare Widerstand war in Phase I gelegt, notwendigerweise unmittelbar an die Klemmen des Motors; Effekt und Strom des Voltmeters wurden also in den Instrumenten mitgemessen und mussten von den Ablesungen abgezogen werden, der Strom natürlich von der Wattkomponente. Bei polycyklischem Betrieb liess sich die Ausrechnung beim Strom nicht mehr durchführen, da derselbe keine Sinusform hatte.

3. Unabhängig (Fig. 32).

E_I	J_I	W_I	$\cos\varphi_I$	E_{II}	J_{II}	W_{II}	$\cos\varphi_{II}$	c_I	s %	PS	η	J_{R_I}	$J_{R_{II}}$
99,8	24,1	1880	0,776	99,9	23,4	1840	0,788	33,1	15,8	3,00	0,590	25,2	27,2
99,9	18,5	1485	0,809	99,8	18,3	1450	0,798	32,9	11,4	2,62	0,657	19,0	21,0
99,8	15,7	1275	0,814	100,0	15,5	1250	0,808	33,0	9,3	2,27	0,663	16,0	17,5
100,2	12,2	1000	0,819	100,2	11,8	950	0,804	33,1	6,55	1,78	0,672	12,0	13,0
99,9	9,7	770	0,794	99,9	9,1	705	0,775	33,1	4,26	1,27	0,634	9,0	9,5
99,9	8,0	600	0,753	99,8	7,4	535	0,724	33,1	3,21	1,860	0,552	—	—
100,1	7,3	530	0,726	99,9	6,9	465	0,674	33,0	2,79	0,655	0,484	—	—
100,0	5,9	400	0,678	100,0	5,5	320	0,564	33,0	1,92	0,342	0,35	—	—
100,1	5,0	275	0,55	100,1	4,5	190	0,423	33,0	1,10	—	—	—	—

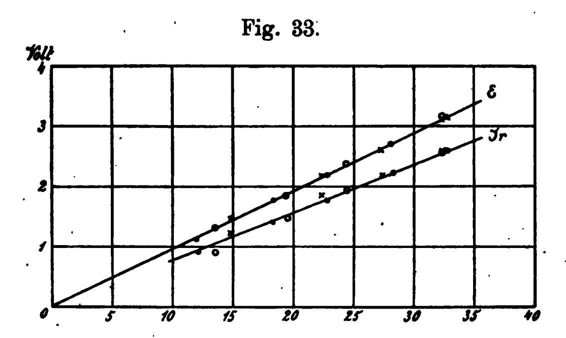
4. Polycyklisch; einphasig induktionsfreie Belastung. ε stellt den halben vektoriellen Spannungsabfall dar.

E_I	W_I	E_{II}	J_{II}	W_{II}	c_I	PS	s	η	J_{R_I}	$J_{R_{II}}$	E_1	E_2	J_1	ε
99,8	1780	100,1	23,5	1740	32,9	2,87	15,1	0,60	24,5	26,5	100,1	97,3	15,0	1,62
99,8	1470	100,2	19,7	1460	33,0	2,62	11,2	0,658	19,0	21,0	100,1	97,4	15,0	1,62
99,9	1255	99,9	16,8	1240	33,1	2,22	9,15	0,655	15,5	17,0	99,9	97,3	15,0	1,62
100,0	985	99,8	13,7	925	33,0	1,72	6,65	0,662	11,8	12,5	100,1	97,5	15,0	1,61
100,0	760	99,8	11,6	705	33,0	1,27	4,12	0,637	9,0	9,5	100,1	97,3	15,0	1,62
100,0	620	100,2	10,6	550	33,2	0,860	3,13	0,541	—	—	100,2	97,5	15,0	1,60
99,9	540	100,0	9,9	465	33,1	0,662	2,73	0,485	—	—	100,1	97,5	15,0	1,61
100,1	410	100,2	9,2	330	33,1	0,342	1,80	0,34	—	—	100,1	97,5	15,0	1,60
100,0	273	99,7	8,7	190	33,2	—	1,07	—	—	—	100,1	97,5	15,0	1,61

Die Resultate dieser vier Versuche sind in den Kurven Fig. 32 wiedergegeben, Versuch 1 und 3 durch Kreise, 2 und 4 durch Kreuze dargestellt. Die gegenseitigen Abweichungen sind ebenso gross zwischen den gleichartigen als zwischen den ungleichartigen Versuchen, so dass jedenfalls praktisch — in den Grenzen sorgfältig durchgeführter Versuche — keine Abhängigkeit vorhanden ist. Die letzte Kolonne zeigt eine minimal abnehmende Tendenz für den Spannungsabfall mit abnehmender Belastung. Aus diesem Grunde wurden Spannungsabfallkurven für den Einphasenstrom bei verschiedenen Motorbelastungen aufgenommen; aber auch dabei blieben Abweichungen, sofern sie überhaupt vorhanden waren, in den Grenzen der Beobachtungsfehler. Nun kann eine Aenderung des Spannungsabfalls durch Aenderung entweder der Streuung oder der Wattkomponente eintreten; letzteres müsste aber eine Effektübertragung auf den Rotor zur Folge haben und diese müsste sich in den Rotorströmen und in der Schlüpfung bemerkbar machen. Der erste Einfluss wird wegen der verschiedenen Periodenzahlen schwer zu konstatieren sein, letzterer am leichtesten bei Leerlauf. Es wurden daher die beiden Antriebsmotoren für den Zwei- bezw. Einphasenstrom an verschiedene Batterien gelegt und ein superponierter Strom von 35 Amp. plötzlich durch den Motor geschickt (dies geschah durch Einschalten der Erregung der Einphasenmaschine, nicht etwa durch Unterbrechung, da die damit verbundene Aufhebung der Verkettung eine Einwirkung hätte haben können); dabei wurden die Tourenzahlen von Generator und Motor beobachtet. Es zeigte sich, dass der Strom im Zweiphasengenerator etwas bremsend wirkte und die Touren etwas abfielen, im Motor aber scheinbar etwas weniger als im Generator; dabei kann es sich nur um eine Umdrehung, höchstens zwei als Differenz gehandelt haben, d. h. 1 bis 2 ‰; mit Sicherheit waren derartige Grössen natür-

lich nicht messbar und sind auch praktisch ganz bedeutungslos. Denkbar ist eine derartige Wirkung, da die vorhergehenden Versuche nebenbei schon gezeigt haben, dass die Wickelung nicht induktionsfrei ist; denn der ganze vektorielle Spannungsabfall ist grösser als der arithmetische und ein Teil des Streufeldes kann auf den Rotor wirken. Um letzteren

Fig. 33.



Punkt noch auf andere Weise zu untersuchen, wurde bei den Aufnahmen der Spannungsabfallkurven der Drosselspule nicht nur der halbe vektorielle Spannungsabfall, sondern noch dessen Wattkomponente gemessen, indem die Spannungsspule eines Wattmeters an diese Spannungsdifferenz gelegt wurde; das so erhaltene $J_1^2 . r$ ergab durch Division durch J den gesuchten Wert (Fig. 33).

1a. Motor ruhend, einphasig induktionsfrei belastet (Kreise in der Figur).

E_1	E_2	J_1	c	ε	J . r
100,0	94,2	32,3	66	3,15	2,54
100,0	96,0	24,5	66	2,38	1,96
99,9	96,4	19,3	66	1,87	1,45
99,9	97,4	13,6	66	1,31	0,89
100,1	99,1	8,4	66	—	—

1b. Dasselbe, induktive Belastung.

E_1	E_2	J_1	W_1	cos φ	ε	J . r	c_1
99,9	93,3	36,1	2390	0,709	3,42	2,74	66
100,1	95,6	27,9	1870	0,702	2,65	2,12	66
100,0	96,7	18,8	1290	0,699	1,77	1,44	66
99,9	97,8	13,2	900	0,697	1,27	0,99	66
100,0	98,7	8,7	600	0,697	—	—	66

Die Temperatur bei diesen beiden Versuchen, ebenso wie bei den beiden folgenden, betrug nur 20 °, da es umständlich gewesen wäre, hier die frühere Temperatur innezuhalten, und hier, wo die Wattkomponente des Spannungsabfalles gemessen wird, leicht reduziert werden kann. Bei diesem Versuche bei ruhendem Motor blieb ein Oeffnen und Schliessen des Rotors ganz ohne Einfluss auf den Spannungsabfall, während die Rotorlage eine geringe Einwirkung auf ε, dagegen nicht auf die Wattkomponente zeigte.

2a. Motor leerlaufend, einphasig induktionsfrei belastet (Kreuze in der Figur).

E_I	W_I	E_{II}	W_{II}	c_I	s	E_1	E_2	J_1	ε	J . r	c_1
100,0	275	99,9	195	33,1	1,13	100,0	94,5	32,3	3,10	2,59	66,0
100,0	270	99,8	200	33,2	1,15	99,9	95,1	27,3	2,63	2,20	65,9
100,1	280	99,8	190	33,0	1,13	100,0	96,4	22,3	2,21	1,90	66,0
99,8	270	100,2	200	33,2	1,15	100,1	97,0	14,8	1,49	1,26	66,0
100,0	275	99,9	190	33,0	1,15	100,1	97,9	12,0	—	0,94	66,0

2b. Motor leerlaufend, einphasig induktiv belastet.

E_I	W_I	E_{II}	W_{II}	c_I	s	E_1	E_2	J_1	$\cos \varphi_1$	ε	J . r	c_1
100,1	275	99,8	190	33,0	1,15	100,1	93,9	36,5	0,708	3,55	2,96	66
100,1	270	99,9	195	33,0	1,11	100,1	95,0	30,2	0,698	2,92	2,38	66
100,0	265	99,9	190	33,2	1,10	100,0	96,5	20,9	0,693	1,91	1,58	66
99,9	265	100,2	185	33,0	1,12	99,9	97,8	13,1	0,702	1,27	1,06	66
100,0	265	99,9	185	33,1	1,12	100,0	98,5	10,0	0,701	—	—	66

Der Unterschied im Leerlaufeffekt zwischen diesen beiden Versuchen rührt daher, dass die Wirbelstrombremse dazwischen erregt und das remanente Feld, in dem sich die Scheibe bewegte, daher wahrscheinlich etwas verstärkt worden war; Schwankungen erklären sich aus dem Andrücken des Tachometers und aus den unvermeidlichen Ablesefehlern.

3a. Motor belastet; einphasig induktionsfrei belastet (Punkte in Fig. 33).

E_I	W_I	E_{II}	W_{II}	c_I	PS	s	J_{I_R}	J_{II_R}	E_1	E_2	J_1	ε	J . r
100,2	905	99,8	840	33,2	1,54	5,88	10,6	11,4	99,9	94,2	32,6	3,18	2,58
100,0	900	99,9	835	32,9	1,53	5,42	10,6	11,5	100,1	95,4	28,0	2,70	2,24
100,2	900	100,2	845	33,1	1,55	5,37	10,5	11,6	100,0	96,2	22,7	2,18	1,76
100,1	905	100,1	840	33,1	1,55	5,40	10,8	11,8	100,1	97,1	18,5	1,80	1,4
100,0	910	99,9	840	33,1	1,55	5,38	10,5	11,5	100,1	97,9	12,1	1,11	0,8

3b. Motor belastet; einphasig induktiv.

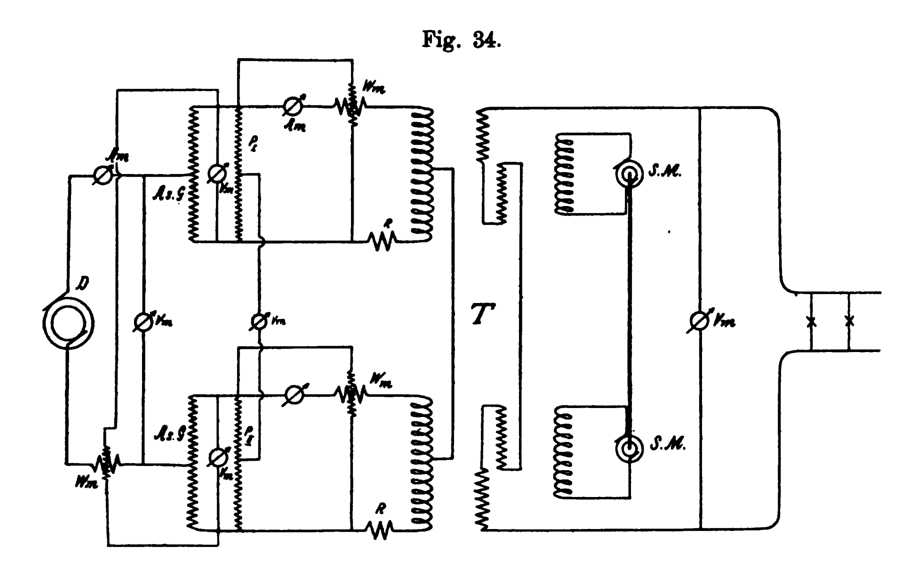
E_I	W_I	E_{II}	W_{II}	c_I	PS	s	J_{R_I}	$J_{R_{II}}$	E_1	E_2	J_1	$\cos \varphi_1$	ε	J . r
100,2	910	100,1	840	33,1	1,55	5,42	10,8	11,4	100,1	94,0	35,4	0,698	3,50	2,96
99,8	905	99,8	835	33,0	1,53	5,46	10,8	11,3	100,1	95,4	29,3	0,695	2,89	2,39
99,8	900	99,7	835	33,1	1,54	5,43	10,5	11,3	100,0	95,8	24,6	0,696	2,42	2,03
99,8	900	99,7	840	33,1	1,54	5,45	10,7	11,5	100,1	97,1	18,2	0,701	1,80	1,48
100,1	905	100,0	830	33,1	1,55	5,42	10,5	11,3	100,1	98,1	12,8	0,697	1,27	0,99

Beim letzten Versuch war die Temperatur $\sim 30^0$, beim vorletzten 25^0. Der Ohmsche Widerstand der Wickelungshälfte, an der die Messung von ε gemacht wurde, betrug bei 20^0 0,0802 Ω, dementsprechend 0,0818 bei 25^0 und 0,0834 bei 30^0. Damit stimmen die Ablesungen, mit Ausnahme der kleinsten in jeder Tabelle stehenden, genügend genau überein. Wie die Kurven (Fig. 33) zeigen, welche ε und J . r für induktionsfreie Belastung darstellen, fallen alle Punkte annähernd in dieselbe Gerade und eine Abhängigkeit vom Zustand des Motors kann auch hier nicht konstatiert werden. Berechnet man die Reaktanz aus diesen Versuchen, so ergibt sich auch keine Differenz zwischen den verschiedenen Versuchsreihen, wohl aber zeigt sie eine Zunahme bei geringerem Strom, was auf die Aenderung der Permeabilität in den Nutenstegen zurückzuführen sein dürfte. Der Mittelwert der Reaktanz ist für die eine Hälfte der Wickelung 0,054 Ω, entsprechend einer Induktanz für den ganzen Motor von $2,6 \cdot 10^{-4}$ Henry.

Zum Schluss wurde noch die Maschine als asynchroner bifilarer Generator geprüft, da ein gewöhnlicher bifilarer Generator nicht zur Verfügung stand, und um den Verhältnissen einer praktischen Anlage näher zu kommen, wurde auch noch der Transformator mit eingeschaltet. Der Zweiphasenkreis wurde mit Synchronmotor, der Einphasenkreis mit Glühlampen belastet. Bezüglich des Spannungsabfalles vom Anfang bis zum Ende der Uebertragung ist zu bemerken, dass derselbe nicht direkt mit der früher bestimmten vergleichbar ist, da hier der Widerstand der Leitung noch in die Messung eingeht; derselbe ist beträchtlich wegen des hohen Widerstandes der Ampèremeter, und musste aus den früher angegebenen Gründen noch durch einen gleich grossen in der parallelen Leitung vergrössert werden; auch hatte der Induktionsgenerator im Mittel 50^0, während der Transformator kaum erwärmt war. Bei diesen Versuchen zeigte

sich auch keinerlei anormale Erscheinung, die von der Theorie abgewichen wäre; als Beispiel mögen zwei Versuchsreihen angeführt werden: die erste stellt variablen Einphasenstrom unter fester Generatorbelastung dar, die zweite feste Einphasenbelastung unter Variation der Generatorbelastung. Das Schaltungsschema entspricht ganz den früheren

Fig. 34.



und ist in Fig. 34 wiedergegeben. AsG bedeutet den asynchronen Generator, SM den Synchronmotor. Gemessen wurden Generatorspannung und Leistung pro Phase (E_I, W_I, E_{II}, W_{II}), Schlüpfung (s), und beim superponierten System Strom, Spannungen vor und hinter dem Generator mit neutralem Punkt und Sekundärspannung des Transformators (E_1,· E_2, E_3, J_1).

Zweiphasige Belastung konstant:

E_I	W_I	E_{II}	W_{II}	cI	s %	E_1	E_2	E_3	J_1	W_1	c_1
100,0	1085	100,0	980	33,0	6,8	100,0	99,5	149,2	2,8	130	66
100,0	1060	100,0	945	33,0	6,2	100,0	98,6	146,7	9,1	870	66
100,0	1072	100,0	935	33,0	6,4	100,0	96,9	142,9	16,2	1570	66
100,1	1070	100,1	955	33,0	6,4	100,0	95,7	140,6	22,5	2180	66
100,1	1070	100,1	955	33,0	6,4	100,0	95,6	138,0	28,1	2800	66

Einphasige Belastung konstant:

EI	WI	EII	WII	cI	s	E_1	E_2	E_3	J_1	W_1	c_1
100,0	1560	100,2	1420	33,0	11,8	100,0	97,2	143,6	15,0	1422	66
100,0	1400	100,0	1290	33,0	9,1	99,9	97,1	143,7	15,0	1420	66
99,9	1235	100,0	1120	33,0	8,05	99,9	97,0	143,5	15,0	1420	66
99,9	1045	99,9	920	33,0	6,35	100,0	97,2	143,7	15,0	1425	66
100,0	815	100,0	705	33,0	4,80	99,9	97,0	143,6	15,0	1420	66
100,0	525	100,1	435	33,1	3,16	99,9	97,0	143,4	15,0	1425	66
100,0	275	100,0	190	33,0	1,50	100,0	97,3	143,5	15,0	1425	66

Anormale Betriebsbedingungen.

Wie bereits in früheren Abschnitten beiläufig erwähnt wurde, treten bei Unterbrechung einer primären Leitung bei den verschiedenen Apparaten anormale Spannungsverhältnisse auf, die Beachtung verdienen. Da die experimentellen Aufnahmen nur über den vorliegenden Fall Aufschluss geben, erscheint eine theoretische Untersuchung aller möglichen Fälle am Platze. Dieselbe wird sich zunächst auf den polycyklischen Transformator erstrecken, wobei sein Verhalten bei Leerlauf und Kurzschluss in einer der sekundären Wickelungen betrachtet werden soll, und zwar sowohl für Unterbrechung in einer einzigen Leitung als auch in mehreren; daran anschliessend werden die experimentellen Ergebnisse zur Bestätigung mitgeteilt werden. Dann soll untersucht werden, ob andere Anordnungen bei gleichem Transformationsprinzip oder besondere Vorrichtungen die besprochenen Erscheinungen zu vermeiden gestatten und schliesslich die praktische Bedeutung bezw. Gefährlichkeit beleuchtet werden.

Da die in diesen Rahmen gehörigen Rechnungen und Erörterungen an und für sich etwas langwierig sind, wird es zweckmässig sein, erst die Grundlagen der Rechnungen allgemein anzudeuten, um sich später um so kürzer fassen zu können. Zunächst ist festzustellen, dass, wenn eine Phase des Grundsystems nicht unterbrochen ist, in dieser jedenfalls auch die normale Spannung induziert werden und der normale Belastungs- oder Magnetisierungsstrom fliessen muss; also werden auch die normalen Kraftflüsse in den betreffenden Transformatorsäulen vorhanden sein. Da wir nur die anormalen Erscheinungen untersuchen wollen und die Ströme und Flüsse (bei konstanter Permeabilität, die wir annehmen) sich einfach superponieren, werden wir die Ströme

und Flüsse der nicht unterbrochenen Phase zur Vereinfachung stets aus den Rechnungen weglassen. Wir werden bei der Rechnung von Momentanwerten der Induktionsflüsse ausgehen, für welche die den Kirchhoffschen Gesetzen nachgebildeten Gesetze des magnetischen Kreises (Streuung vernachlässigt) eine erste Bedingungsgleichung ergeben werden. Da die gegenseitigen Phasen der Flüsse uns bekannt sein werden, können wir aus der Aenderungsgeschwindigkeit zu den induzierten E.M.K.en übergehen; sind die bekannten zugeführten Spannungen diesen (annähernd) gleich, so ergibt sich eine zweite Gleichung für die Induktionsflüsse. Des weiteren können wir auch noch die direkten oder aus primär oder sekundär resultierenden Magnetisierungsströme einführen, deren Verteilung auf die einzelnen Säulen zum Teil nur durch die jeweilige Anordnung der elektrischen Kreise bedingt ist. Gelingt es uns auf diese Weise, die Induktionsflüsse pro Säule der Grösse und Richtung nach zu finden, so ergeben sich daraus die Spannungen in den einzelnen Wickelungsteilen und damit ist die Aufgabe gelöst. Bemerkt sei noch für den viersäuligen Transformator, dass wir einen z. B. aus Säule I und III gebildeten magnetischen Kreis (Fig. 1 a) in Bezug auf Widerstand einem z. B. aus Säule I und II gebildeten gleichsetzen; die Berechtigung ergibt die nähere Betrachtung der Figur. Dementsprechend ist auch stets, wenn kurz von einer Säule die Rede ist, ein solcher halber magnetischer Kreis gemeint. Ob die Zweiphasengeneratoren gewöhnlich oder bifilar sind, ist für das Verhalten des Transformators gleichgültig.

1. Fall. Polycyklischer Transformator: Ein Leiter primär unterbrochen. Charakteristisch für diesen Fall ist, dass die eine Hälfte der einen Phase ausgeschaltet ist, die andere mit dem Einphasengenerator einfach in Reihe liegt (s. Fig. 35—37); wir führen also in ähnlicher Weise wie früher statt der Einphasenspannung E_1 jetzt eine höhere Spannung zu

$$\sqrt{E_1^2 + \left(\frac{E_I}{2}\right)^2} = E_r.$$

a) Leerlauf (Fig. 35). Die Verbindung mit Säule IV sei unterbrochen. Zunächst muss der Fluss sich im Transformator schliessen, also wenn Z_I, Z_{IV} u. s. w. die momentanen Flüsse pro Säule sind, so ist in jedem Moment

$$Z_I + Z_{II} + Z_{III} + Z_{IV} = 0,$$

wobei die Vorzeichen, welche die momentane Richtung (nach rechts

oder links in der Figur) der Flüsse angeben, in den Symbolen einbegriffen sind. Aus Symmetriegründen ergibt sich

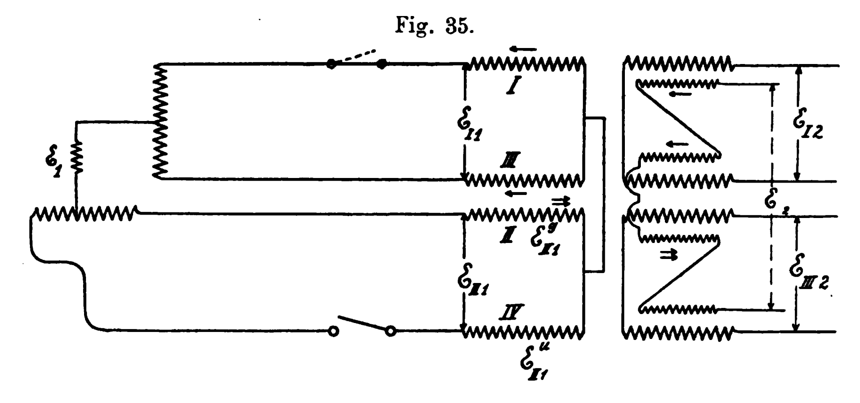
$$+ Z_{I} = + Z_{III}.$$

In Säule II fliesst der doppelte Strom wie in I und III und wirkt entgegengesetzt magnetisierend, wie die Pfeile andeuten; daraus folgt, dass

$$Z_{II} = -2 Z_{I} \qquad \text{und} \qquad Z_{IV} = 0.$$

Wir finden also, da die Flüsse gleichphasig sind, dass in II die doppelte E.M.K. induziert wird, wie in I und III, und erhalten, da

Fig. 35.



I und III parallel sind, wenn wir den Ohmschen Spannungsabfall und denjenigen in den Generatoren (was für unsere Rechnungen zulässig ist) vernachlässigen, als induzierte E.M.K.e für II $\frac{2}{3}$ E_r, für I und III $\frac{1}{3}$ E_r.

Ist a_I das Uebersetzungsverhältnis für das Grundsystem, a_1 für das superponierte, so sind die Sekundärspannungen

$$E_{II_2} = \frac{2}{3} E_r \frac{1}{a_I} \qquad \text{und} \qquad E_2 = \frac{4}{3} \cdot E_r \frac{1}{a_1} \cdot \frac{1}{2}.$$

Der Faktor $\frac{1}{2}$ rührt daher, dass für die Einphasenwickelung das Uebersetzungsverhältnis pro Säule nur $\frac{a_1}{2}$ ist. Ob diese Spannungen höher oder niedriger als die normalen sind, hängt von dem Verhältnis von E_I zu E_1 ab, jedenfalls werden Erhöhungen selten erheblich sein.

b) Kurzschluss in der sekundären Einphasenwickelung (Fig. 36). Wir betrachten direkt den extremen Fall, da sich bei diesem

die Erscheinungen schärfer ausprägen und die Rechnung einfacher wird. Den Ohmschen Widerstand können wir trotzdem vernachlässigen, da die Ströme durchaus nicht die Grösse von „Kurzschlussströmen“ haben. Als erste Bedingung haben wir wieder

$$Z_I + Z_{II} + Z_{III} + Z_{IV} = 0$$

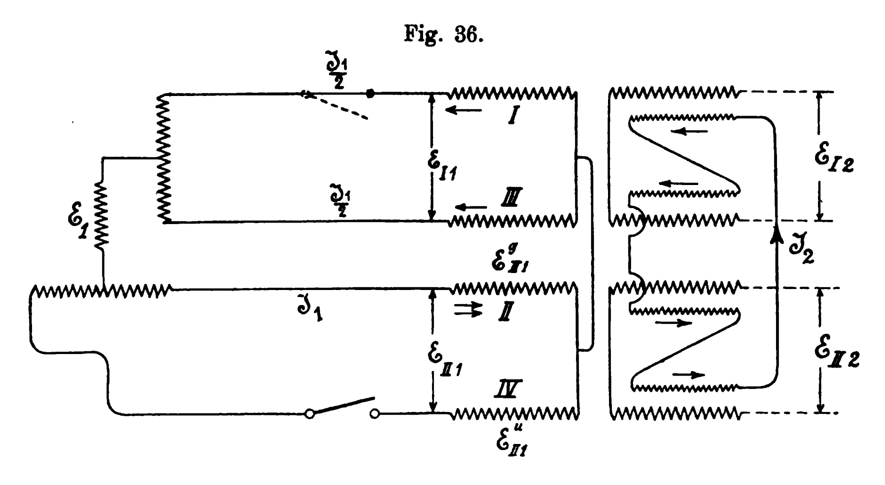
und daher

$$\frac{d\,Z_I}{d\,t} + \frac{d\,Z_{II}}{d\,t} + \frac{d\,Z_{III}}{d\,t} + \frac{d\,Z_{IV}}{d\,t} = 0.$$

Zweitens muss wegen des Kurzschlusses in jedem Momente die Summe der in den vier Wickelungsteilen der Einphasensekundärwickelung induzierten Spannungen gleich 0 sein, also

$$e_1 + e_2 + e_3 + e_4 = 0.$$

Fig. 36.



Daraus folgt, wenn wir berücksichtigen, dass der Wickelungssinn auf je zwei Säulen entgegengesetzt ist,

$$\frac{d\,Z_I}{d\,t} + \frac{d\,Z_{III}}{d\,t} - \frac{d\,Z_{II}}{d\,t} - \frac{d\,Z_{IV}}{d\,t} = 0.$$

Aus beiden Gleichungen folgt

$$\frac{d\,Z_I}{d\,t} = -\frac{d\,Z_{III}}{d\,t} \quad \text{und} \quad \frac{d\,Z_{II}}{d\,t} = -\frac{d\,Z_{IV}}{d\,t}.$$

Auf Säule I und III wirken die Ströme $\frac{J_1}{2} - \frac{J_2}{2\,a_1}$ magnetisierend, daher müssen sie auch bei ihrer symmetrischen Lage die gleichen Induktionsflüsse führen, also

$$Z_I = Z_{III} \quad \text{und} \quad \frac{d\,Z_I}{d\,t} = \frac{d\,Z_{III}}{d\,t}.$$

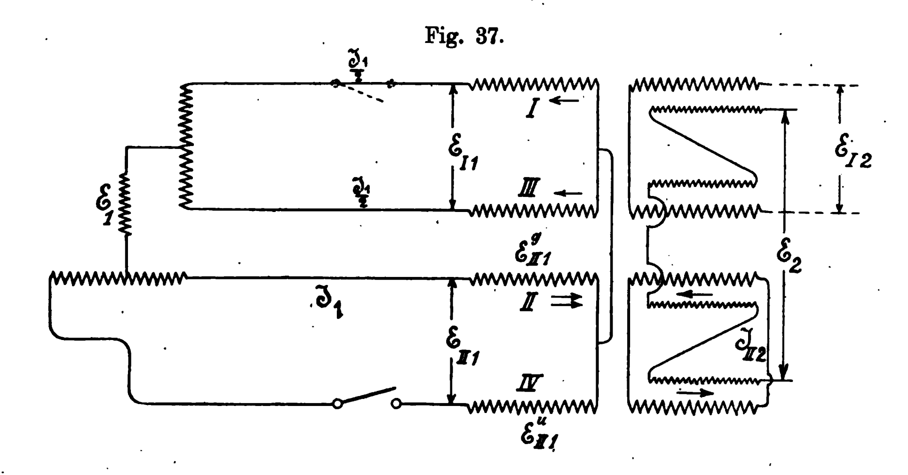
Beide Bedingungen sind nur zu erfüllen durch $\frac{d\,Z_I}{d\,t} = \frac{d\,Z_{III}}{d\,t} = 0$, was bei Wechselstrom mit $Z_I = Z_{III} = 0$ gleichbedeutend ist, d. h. der ganze Fluss geht durch Säule II und IV. Die resultierenden Magnetisierungsströme müssen dafür in I und III = 0, in II und IV gleich sein, was sich durch

$$\frac{J_1}{2} = \frac{J_2}{2\,a_1}$$

ausdrückt.

Wir sehen auch daraus, dass die Ströme ihrer Grössenordnung nach Leerlaufströme sind, dass also die Vernachlässigung des Ohmschen Widerstandes für unsere Zwecke auch hier statthaft war.

Fig. 37.



Die ganze Spannung E_r muss also in Säule II induziert werden; ferner wird Säule IV von gleichem Flusse durchsetzt, aber da von der sekundären Seite erregt, in entgegengesetztem Sinne als normal, d. h. die Teilspannungen werden sich addieren statt zu subtrahieren und wir erhalten im Grundsystem die Spannungen

$$2\,E_r \text{ bezw. } 2\,E_r \frac{1}{a_I},$$

also unter allen Umständen eine wesentliche Spannungserhöhung.

c) Kurzschluss einer sekundären Zweiphasenwickelung (Fig. 37). Der Ohmsche Widerstand wird wieder vernachlässigt, und die erste Gleichung für die Flüsse ist wieder dieselbe. Ferner ergibt sich wie früher aus dem Kurzschluss die Gleichung

$$Z_{II} - Z_{IV} = 0,$$

wobei die Vorzeichen dadurch bedingt sind, dass die betreffenden Wickelungen, in denen die Spannungssumme gleich 0 sein muss, auf dem Transformator entgegengesetzt angeordnet sind. In den beiden Säulen I und III muss wieder aus Symmetriegründen sein

$$Z_I = Z_{III}.$$

Daraus folgt dass $Z_I = - Z_{II} = Z_{III} = - Z_{IV}$, d. h. in allen Säulen wird eine gleich grosse Spannung induziert, die gegeben ist durch $\frac{E_r}{2}$ primär, da I und III parallel liegen; ausserdem haben alle Flüsse die normale Richtung: demnach wird in der sekundären Einphasenwickelung $\frac{E_r}{a_1}$ induziert.

Betrachten wir die Fälle b) und c) zusammen, so sehen wir, dass der kurzgeschlossene (bezw. belastete) Kreis auf den anderen spannungserhöhend wirkt, dass also Belastung bei beiden die Wirkungen mehr oder weniger aufheben wird. Träte sogar in beiden gleichzeitig Kurzschluss auf, so würden wirkliche Kurzschlussströme entstehen, die dann durch Zerstörung von Sicherungen u. s. w. sich selbst abschalten würden.

2. Fall. Zwei Leiter in verschiedenen Phasen primär unterbrochen (Säule I und IV). Es wird dann statt einer Spannung E eine höhere zugeführt, die gegeben ist durch (vergl. Fig. 35)

$$E_r' = \sqrt{E_1^2 + \frac{E_I^2}{4} + \frac{E_{II}^2}{4}}.$$

a) Leerlauf. Da die Spannung E_r' in den beiden Säulen II und III induziert werden muss und beide den gleichen Magnetisierungsstrom im normalen Sinne führen, so werden diese beiden Säulen gleiche Flüsse haben und die beiden anderen leer ausgehen. Es wird also einphasig sekundär $\frac{E_r'}{2a}$, zweiphasig sekundär $\frac{E_r'}{2a_I}$ entstehen.

b) Kurzschluss im Einphasenkreise. Genau wie unter 1_b erhalten wir zunächst $Z_I = - Z_{III}$ und $Z_{II} = - Z_{IV}$.

Aus Symmetriegründen muss ausserdem

$$Z_{II} = - Z_{III},$$

wobei das Vorzeichen den umgekehrten Wickelungssinn berücksichtigt. Alle vier Flüsse sind demnach gleich und in Bezug auf das Grundsystem normal gerichtet, es wird also in demselben pro Phase $2\frac{E_r'}{2}$ entstehen, sekundär entsprechend.

c) Kurzschluss in einer Phase des Grundsystems. Es werden sich zunächst wieder die beiden Bedingungen ergeben

$$Z_I + Z_{II} + Z_{III} + Z_{IV} = 0$$

und

$$Z_{II} = Z_{IV}.$$

Der magnetisierende Strom in Säule II ist $J_1 - \frac{J_{II}}{a_I}$, in IV: $-a_I J_{II}$, in III: J_1 und in I 0. Die Summe der magnetisierenden Wirkungen in II und IV ist in jedem Augenblicke gleich derjenigen in III; da die beiden ersten gleichsinnig sind, letztere entgegengesetzt und alle auf ein magnetisches Leiterstück gleichen Widerstandes wirken, so muss der Fluss der Säulen II und IV sich ganz durch III schliessen. Da die Flüsse in II und IV ausserdem gleich sein müssen, so muss $J_I = \frac{2 J_2}{a_I}$ sein, und jeder der Flüsse in II und IV die Hälfte von dem in III, während I leer ausgeht. Demnach wird von E_r' in III $\frac{2}{3}$, in II $\frac{1}{3}$ induziert; die Sekundärspannung im Einphasenkreis beträgt

$$\frac{2}{3} \frac{E_r'}{2 a_1} + 2 \frac{E_r'}{J . 2 a_1} = \frac{2}{3} \frac{E_r'}{a},$$

in der nicht kurzgeschlossenen Phase $\frac{2}{3} E_r' \frac{1}{a_I}$.

Wenn zwei Leiter unterbrochen sind, werden die Spannungserhöhungen also geringer als im ersten Falle, und ausserdem sind auch hier wieder offenbar die Fälle, in welchen der nicht kurzgeschlossene Sekundärkreis (bezw. beide Phasen des Grundsystems, die hier gleichwertig sind) ganz offen ist, am ungünstigsten.

Vergleichen wir mit diesen Ergebnissen die experimentellen Resultate: bei Gewinnung derselben wurde erst die Leitung unterbrochen und dann allmählich der Kurzschluss hergestellt; dabei wurden wegen der Stromschwankungen die Klemmenspannungen der Generatoren nachreguliert. Die Bezeichnungen sind die gleichen wie bei den ersten Experimenten; die Teilspannungen an der unterbrochenen Phase sind $E_{II_1}{}^u$ und $E_{II_1}{}^g$ für die Seite des unterbrochenen und des geschlossenen Leiters. Die Spannungen E_r und E_r' sind 112 und 123 Volt.

1. Beide Generatoren erregt, Transformator leer (Fig. 35):

$$E_1 = 100; \; E_2 = 150; \; E_{I_1} = E_{II_1} = 100 \text{ Volt.}$$

Ein Leiter unterbrochen:

$$E_1 = 100;\ E_2 = 114;\ E_{I_1} = 100;\ E_{I_2} = 98.3,$$
$$E_{II_1} = 70:\ E_{II_2} = 69;\ E_{II_1}{}^u = 5;\ E_{II_1}{}^g = 74.$$

Diese Resultate weichen etwas ab, erstens weil die Nachregulierung der einzelnen Spannungen nicht vollständig war, dann wegen der einschränkenden Voraussetzungen der Theorie. Dass z. B. in der unterbrochenen Säule nicht die Spannung 0, sondern 5 Volt induziert wird, erklärt sich leicht aus geringen Ungleichheiten der magnetischen Widerstände (Luftspalt) und aus dem Einfluss der Permeabilität.

2. Einphasenkreis belastet

$$E_1 = 100;\ E_2 = 149;\ E_{I_1} = E_{II_1} = 100 \text{ Volt},$$
$$E_{I_2} = E_{II_2} = 98{,}2 \text{ Volt};\ J_2 = 14 \text{ Amp.}$$

Ein Leiter unterbrochen:

$$E_1 = 98;\ E_2 = 26{,}5;\ J_2 = 3{,}7 \text{ Amp.};\ E_{I_1} = 100,$$
$$E_{I_2} = 98{,}2;\ E_{II_1} = 170;\ E_{II_2} = 167{,}5;\ E_{II_1}{}^u = 97;\ E_{II_1}{}^g = 76.$$

Herstellung eines Kurzschlusses (Fig. 35)

$$E_1 = 99;\ E_2 = 0;\ J_1 = \backsim 6 \text{ Amp.};\ E_{I_1} = 100;\ E_{I_2} = 98{,}2,$$
$$E_{II_1} = 226;\ E_{II_2} = 222;\ E_{II_1}{}^u = 114;\ E_{II_1}{}^g = 113.$$

(Die Werte über 150 Volt wurden mit einem Hitzdrahtvoltmeter [Hartmann & Braun] gemessen.) Dabei waren die Spannungen an den einzelnen Säulen der nicht unterbrochenen Phase je 51 Volt. Wurde die Erregung dieser Phase abgeschaltet, so blieb eine Spannung von ∽ 1 Volt an jeder Säule. Damit ist obige Theorie bestätigt. Der Strom in der Sekundärwickelung muss demnach beide Periodenzahlen enthalten; um das auch noch zu prüfen, wurde ein Wattmeter eingeschaltet, dessen Spannungsspule an den Einphasengenerator und den Generator der offenen Phase gelegt wurde; beidemale war ein Ausschlag vorhanden, dagegen kaum bei Anlegung der Spannungsspule an die andere Phase, welche gegen den Strom eine erhebliche Phasenverschiebung hat. Ausserdem flackerten Glühlampen, welche man als Belastung in den Einphasenkreis schaltete, und es konnte durch Verminderung der Periodenzahl des Einphasengenerators festgestellt werden, dass die Zahl der Schwankungen der Differenz der Periodenzahlen entsprach (wie bei sogenannten Phasenlampen). (Dass eine Differenz von 33 ∽ noch sichtbares Flackern hervorbringt, steht in keinem Widerspruch damit, dass Glühlichtbeleuchtung schon bei 25 Perioden möglich ist, denn dort hat man eben 50 Wechsel der Intensität.)

Wurde der Kurzschluss im zweiphasigen Sekundärsystem gemacht, so fanden sich folgende Werte (Fig. 37):

$$E_1 = 100;\ E_2 = 165;\ E_{I_1} = 100;\ E_{I_2} = 98{,}2,$$
$$E_{II_1} = 0;\ J_1 = 60;\ E_{II_1}{}^u = 55;\ E_{II_1}{}^g = 55.$$

Die Teilspannungen an den Säulen der nicht unterbrochenen Phase sind 55 Volt, wenn der betreffende Generator unerregt bleibt. Ist ferner je ein Leiter jeder Phase offen, so ist für den Leerlauf

$$E_1 = 100;\ E_2 = 100;\ E_{I_1} = 60;\ E_{II_1} = 60,$$
$$J_1 = 2;\ E_{I_1}{}^u = 0;\ E_{I_1}{}^g = 60;\ E_{II_1}{}^u = 0;\ E_{II_1}{}^g = 60.$$

Kurzschluss in der Einphasenwickelung

$$E_1 = 100;\ E_2 = 0;\ E_{I_1} = 118;\ E_{II_1} = 118,$$
$$J_1 = 4{,}5;\ E_{I_1}{}^u = 59;\ E_{I_1}{}^g = 59.$$

Kurzschluss in einer der Zweiphasenwickelungen

$$E_1 = 100;\ E_2 = 120 \text{ Volt};\ E_{I_1} = 78;\ E_{II_1} = 0,$$
$$J_1 = 2{,}8;\ E_{I_1}{}^g = 78;\ E_{I_1}{}^u = 0;\ E_{II_1}{}^u = 39;\ E_{II_1}{}^g = 39.$$

Ferner wurde noch bei gleichzeitiger Belastung der verschiedenen Sekundärkreise in beiden Fällen ein rasches Anwachsen des Stromes festgestellt, mit gleichzeitiger Abnahme der erhöhten Spannungen. Damit sind die gezogenen Folgerungen experimentell bestätigt.

Es drängt sich zunächst die Frage auf, ob die gleichen Erscheinungen bei anderen Transformationsmethoden auch auftreten. Eine getrennte Transformation, d. h. Trennung des superponierten Stromes durch Bifilarwickelung und gesonderte Transformation würde nicht zum Ziele führen, da die Drosselspulen, wie noch näher zu erläutern, eine ähnliche unangenehme Eigenschaft haben. Man kann dann noch mit zwei dreisäuligen Transformatoren oder vier Einphasentransformatoren operieren; untersuchen wir beide Fälle näher.

3. Fall. Zwei dreisäulige Transformatoren. Ein Leiter unterbrochen.

Bei den dreisäuligen Transformatoren wird man die dritte Säule, welche nur als magnetische Rückleitung für den superponierten Strom dient, nicht sekundär bewickeln, da eine solche Trennung der beiden Wickelungen zu grosser Streuung führen müsste. Wir nehmen also die Säule unbewickelt an.

a) Bei Leerlauf ist der Fall ähnlich dem des viersäuligen Transformators und es kann darauf verwiesen werden.

b) Kurzschluss in der sekundären Einphasenwickelung.

Als erste Bedingung haben wir hier, dass alle Spannung in der Wickelung aufgebraucht wird. Wir setzen dabei die Vorzeichen der Flüsse so fest, dass wir ihnen das gleiche Vorzeichen geben, sofern sie in gleicher Richtung auf die Einphasenwickelung wirken. Es seien Z_I und Z_{III} die Induktionsflüsse der Phase I, Z_{II} und Z_{IV} der Phase II, während Z_{s_1} und Z_{s_2} sich auf die magnetischen Rückleitungen beziehen.

Wir schreiben also

$$\frac{d}{dt}(Z_I + Z_{II} + Z_{III} + Z_{IV}) = 0.$$

Ausserdem ist, da die Säulen I und III symmetrisch sind und von parallelen Leitern beeinflusst werden,

$$Z_I = Z_{III}.$$

Durch Z_I (bezw. Z_{III}) und Z_{II} muss die Gegenspannung E_r induziert werden.

Dadurch, dass wir beiden Gruppen Z_I und Z_{III}, Z_{II} und Z_{IV} in der ersten Gleichung dasselbe Vorzeichen gegeben haben bezüglich ihrer Wirkung auf die Einphasenwickelung, sind die zwei Flüsse Z_I und Z_{II}, die primär die Gegenspannung E_r erzeugen, mit gleichem Vorzeichen zu versehen, da diese Spannung ihrer Zuführung nach als eine superponierte zu betrachten ist.

$$\frac{d}{dt}(Z_I + Z_{II}) = c\, e_r.$$

Hierin ist c = Konstante und e_r Momentanwert von E_r.

Aus diesen Gleichungen folgt:

$$\frac{d}{dt}(Z_{II} - Z_{IV}) = 2\, c\, e_r.$$

Nach unserer Festsetzung waren die Richtungen der Flüsse so, dass ihre Summe die Wirkung auf die sekundäre Einphasenwickelung darstellte, wegen der Wickelungsanordnung muss ihre Differenz die induzierte Wirkung auf das Grundsystem (primär und sekundär) darstellen, d. h. in der unterbrochenen Phase wird eine Spannung $2\, E_r$ induziert werden.

Dieses Resultat lässt sich auch gewinnen, indem man mit den magnetisierend wirkenden Strömen rechnet, die auf parallele Leiterstücke wirken, und das Gesetz der Superposition anwendet. Die Rech-

nung wurde zur Prüfung des eben gewonnenen, experimentell nicht kontrollierbaren Ergebnisses durchgeführt, soll aber ihrer Umständlichkeit wegen nicht wiedergegeben werden; erwähnt sei nur, dass aus ihr genau wie früher die Bedingung $Z_I = Z_{II} = 0$ hervorgeht.

c) Liegt der Kurzschluss in einer zweiphasigen Sekundärwickelung, so muss $Z_{II} = Z_{IV}$ sein, damit die Spannung 0 sei, und die beiden Flüsse gehen durch die Schlusssäule. Ausserdem muss aber in den parallelen Zweigen $Z_I = Z_{III}$ sein. Sind die Flüsse Z_{II} und Z_{IV} gleich, so müssen die magnetisierenden Ströme es auch sein, da die Widerstände gleich sind. Dies ist aber nur möglich, wenn

$$\frac{J_{II}}{a_I} = \frac{J_1}{2}.$$

Dieses ist aber auch die Grösse des Stromes in I und III, also müssen alle vier Flüsse gleich sein, und in den Säulen II, I und III werden je $\frac{E_r}{2}$ induziert, in der Einphasenwickelung $a \,.\, E_r$ genau wie früher.

4. Fall. a) Zwei Leiter unterbrochen. Bei Leerlauf in den beiden nicht unterbrochenen Säulen wird je $\frac{E_r'}{2}$ induziert werden müssen. Der nötige Induktionsfluss $Z_{II} = Z_{III}$ wird sich in beiden Transformatoren auf die beiden anderen Säulen nach dem Verhältnis ihrer magnetischen Widerstände, das mit n bezeichnet werde, verteilen

$$\frac{Z_I}{Z_s} = n \quad \text{und} \quad Z_I + Z_s = Z_{II}.$$

Daraus

$$Z_I \left(\frac{n+1}{n}\right) = Z_{II}.$$

In jeder Phase des Grundsystems beträgt die Spannung also

$$\frac{1}{2} E_r' \,.\, \left(1 + \frac{n}{n+1}\right),$$

im sekundären Einphasenkreis dagegen

$$\frac{1}{2a} E_r' \,.\, \left(1 - \frac{n}{n+1}\right)$$

wegen der umgekehrten Wickelungsanordnung. Dieser Fall weicht also etwas von demjenigen des viersäuligen Transformators ab, jedoch gehört er nicht zu den als wichtig erkannten.

b) Kurzschluss in der Einphasenwickelung. Zunächst finden wir, dass aus Symmetriegründen allein $Z_{II} = Z_{III}$ und $Z_I = Z_{IV}$. Diese beiden Gruppen induzieren jeweils im gleichen Sinne die Einphasenwickelung; da deren Spannung 0 sein soll, so kann nur wegen der Symmetrie

$$Z_I = Z_{II} = Z_{III} = Z_{IV}$$

sein und die im Grundsystem auftretende Spannung pro Phase ist E_r'.

c) Kurzschluss in einer Phase des Grundsystems. Erstens muss wegen der Klemmenspannung 0 : $Z_{II} = Z_{IV}$ sein. Diese beiden Flüsse müssen sich durch die magnetische Rückleitung schliessen, da sie gleichgerichtet sind; wegen der Symmetrie ist ihre Gleichheit nur möglich, wenn die magnetisierenden Ströme $J_1 - \frac{J_{II}}{a_I}$ und $\frac{J_{II}}{a_1}$ gleich sind, d. h.

$$\frac{J_1}{2} = \frac{J_{II}}{a_{II}}.$$

Im anderen Transformator ist diese magnetisierende Kraft J_1 doppelt so gross; der magnetische Widerstand, der für die eben betrachtete Säule II $W(1 + n)$ war, ist hier gegeben durch $W\left(\frac{1+2n}{1+n}\right)$, da der Widerstand der Säule III in Serie liegt mit der Parallelschaltung der beiden anderen Säulen.

Das Verhältnis der Flüsse in den beiden Säulen II und III ist demnach

$$\frac{W\left(\frac{1+2n}{1+n}\right)}{2W(1+n)} = \frac{1+2n}{2(1+n)^2}.$$

In diesen beiden Säulen muss aber E_r' induziert werden, also in Säule II

$$E_r' \frac{1+2n}{1+2n+2(1+n)^2},$$

in Säule III

$$E_r' \frac{2(1+n)^2}{1+2n+2(1+n)^2}.$$

Der Fluss der Säule I findet sich aus dem der Säule III durch Multiplikation mit $\frac{n}{n+1}$, die induzierte Spannung für die Phase I des Grundsystems, also

$$E_r' \frac{2(1+n)^2 + 2n(1+n)}{1+2n+2(1+n)^2},$$

für die sekundäre Einphasenwickelung

$$\frac{1}{2a} E_r' \left(\frac{2(1+n)^2 + 2n(1+n)}{1 + 2n + 2(1+n)^2}\right).$$

Aus diesen Betrachtungen geht hervor, dass wir nur geringe Vorteile erzielen können, und das nur bei den minder wichtigen Fällen, während bei den anderen die Verhältnisse ganz unverändert bleiben.

5. Fall. Vier getrennte Einphasentransformatoren. Dieser Fall kann nun ganz kurz erledigt werden. Bei Unterbrechung eines Leiters und Leerlauf wird wieder im Einphasenkreis $\frac{2}{3} E_r \frac{1}{a}$ in der betreffenden Phase des Grundsystems $\frac{2}{3} E_r$ induziert, wie sich leicht ergibt. Bei Kurzschluss in der Einphasenwickelung kehren die Betrachtungen auch fast unverändert wieder: in den parallelen Zweigen müssen die Flüsse $Z_I = Z_{III}$ sein, die magnetisierenden Ströme $\frac{J_1}{2} - \frac{J_1}{a}$ und wegen des Kurzschlusses $Z_I + Z_{II} + Z_{III} + Z_{IV} = 0$, wobei das Vorzeichen nur noch den Wickelungssinn zu berücksichtigen braucht. Im Transformator II wirkt magnetisierend ein Strom $J_1 - \frac{J_1}{a}$, in IV nur $-\frac{J_2}{a}$; wir können demnach schreiben, da der Strom $\frac{J_1}{a}$ überall im gleichen Sinne wirkt und die Flüsse den Strömen proportional sein müssen:

$$2\left(\frac{J_1}{2} - \frac{J_2}{a}\right) + J_1 - \frac{J_2}{a} - \frac{J_2}{a} = 0,$$

$$J_1 - \frac{2J_2}{a} = 0.$$

Wir erhalten also wieder die gleiche Bedingung wie früher und wissen daher, dass die Spannung E_r ganz in der primären Wickelung von III verzehrt wird und die Spannung in der unterbrochenen Phase auf $2 E_r$ steigen wird. Ist dagegen eine sekundäre Zweiphasenwickelung kurzgeschlossen, so muss wieder $Z_{II} = Z_{IV}$ sein, woraus wegen der Gleichheit der Transformatoren auch die Gleichheit der magnetisierenden Ströme folgt, d. h. der ganze Vorgang spielt sich wie beim viersäuligen Transformator ab. Auch wenn zwei Leiter unterbrochen sind, ergeben sich leicht die Vorgänge wie beim viersäuligen Transformator.


UNIVERSITY OF MICHIGAN
3 9015 02104 8056